



城市污泥资源化利用技术研究进展

李玉双¹, 杨嘉鑫¹, 魏建兵¹, 刘佳昊¹, 侯永侠¹, 宋雪英¹, 陆庆轩²

(1. 沈阳大学环境学院, 区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 辽宁沈阳 110044;

2. 沈阳大学生命科学与工程学院, 辽宁沈阳 110044)

[摘要] 城市污泥成分复杂多变, 除含有大量有机质、植物营养元素外, 还可能浓缩重金属, 微量有机污染物以及少量病原生物等有毒有害物质。随着我国环保要求的提高, 污泥资源化利用已成为污泥安全处理处置的趋势。综述了城市污泥的组成、环境风险、传统污泥处置方法与资源化利用技术, 重点阐述了污泥堆肥、建材利用、沼气利用及生物炭利用等污泥资源化利用技术的研究现状。其中, 污泥堆肥产品可作为营养土满足环境生态修复的需要; 建材利用技术可在实现污泥减量化的同时减缓黏土资源的消耗; 污泥沼气利用技术发展历史较长、相对成熟, 可实现工程应用; 污泥生物炭利用技术在园林绿化、作物种植、水污染和气体污染治理方面具有可观效益, 形成“以废治废”的生态链。上述污泥资源化利用技术具有广阔的应用前景, 有望真正实现环境、社会和经济的多重效益。然而目前还存在着相关处理技术不成熟、设备运行成本过高等问题, 需要进一步开展理论、技术与设备方面的研究, 降低投资与运营成本, 使上述污泥资源化利用技术真正达到技术可行、经济合理。

[关键词] 城市污泥; 环境风险; 资源化; 沼气利用; 生物炭利用

[中图分类号] TU992.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)12-0041-06

Research progress of municipal sludge resource utilization technology

LI Yushuang¹, YANG Jiabin¹, WEI Jianbing¹, LIU Jiahao¹, HOU Yongxia¹, SONG Xueying¹, LU Qingxuan²

(1. Key Laboratory of Ecological Restoration of Regional Polluted Environment, Ministry of Education, School of Environment, Shenyang University, Shenyang 110044, China; 2. School of Life Science and Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: The composition of municipal sludge is complex and variable, which may contain a large amount of organic matter, plant nutrients, but also concentrated heavy metals, trace organic pollutants and a small amount of pathogens and other toxic and harmful substances. With the improvement of environmental protection requirements in China, sludge resource utilization has become the trend of safe sludge treatment and disposal. The composition of municipal sludge, environmental risks, traditional sludge disposal methods and resource utilization technologies were reviewed, and the current research status of sludge resource utilization technologies such as sludge composting, building materials utilization, biogas utilization and biochar utilization was highlighted. Among them, sludge composting products can be used as nutrient soil to meet the needs of environmental ecological restoration. Building material utilization technology can reduce the consumption of clay resources while achieving sludge reduction. Sludge biogas utilization technology has a long history of development and mature, which can realize engineering applications. Sludge biochar utilization technology has considerable benefits in landscaping, crop cultivation, water pollution and gas pollution control, forming an ecological chain of “treating waste with waste”. The above-mentioned sludge resource utilization technologies have broad application prospects and are expected to achieve multiple benefits of environment, society and economy. However, there are still problems such as immaturity of treatment technologies and high operation costs, which require further research on theory, technology and equipment to reduce investment and operation costs, so that the above sludge resource utilization technologies can truly achieve technical feasibility and economic rationality.

[基金项目] 沈阳市科技计划项目(20-206-4-02)

Key words: municipal sludge; environmental risk; resourceization; biogas utilization; biochar utilization

自2015年国务院发布实施《水污染防治行动计划》以来,全国城镇污水处理能力大幅提高。截至2020年我国建成城镇污水处理厂1万多座,污水处理能力已超过2亿 $\text{m}^3/\text{d}^{[1]}$,城市污泥(文中专指城市污水处理厂产生的污泥)的年产量随之迅速增长,已突破6 000万 $\text{t}^{[2]}$ (含水率按80%计)。以沈阳市为例,目前沈阳市县以上共有污水处理厂26座,日产污泥量约为1 600 t。国家发改委、住建部印发的《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》提出,到2025年城市污泥无害化处置率达到90%以上。在此背景下,实现污泥的资源化、减量化、无害化对于城市发展至关重要。

城市污泥的成分复杂,不仅含有氮、磷等营养物质,还含有大量有毒、有害及对环境产生负面影响物质,若不妥善处置,必然给环境带来威胁。污泥资源化利用技术通过回收和再利用污泥中有价值的物质,不仅能解决污泥带来的环境风险问题,还能产生多重效益,已成为污泥处理处置的研究热点。笔者综述了城市污泥的组成和环境风险、传统的污泥处置方法,以及污泥资源化利用技术,重点介绍了污泥的农业利用、建材利用、沼气利用及生物炭利用等技术,并结合国内外的研究与应用情况对发展方向进行展望。

1 城市污泥的组成与安全风险

城市污泥集中产生在污水处理厂的初沉池和二沉池,由多种微生物形成的菌胶团及其吸附的有机物和无机物组成。我国城市污泥的含氮量很高,碳氮比约为3:100。此外,城市污泥含水率也很高,成分复杂多变,其中除含有大量有机质、氮、磷、钾等多种植物营养元素和微量元素外,还可能浓缩有汞(Hg)、铬(Cr)、铅(Pb)、镉(Cd)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)、镍(Ni)等重金属,多环芳烃(PAHs)、氯苯类化合物(CBs)、邻苯二甲酸酯类(PAEs)、直链烷基苯磺酸盐(LAS)、氯酚(CPs)、壬基酚、药物及个人护理品(PPCPs)等微量有机污染物以及少量的病原生物^[3-4]。其中,部分污染物具有生物蓄积效应、“三致效应”等。

2 传统污泥处置方法

目前,传统污泥处置方法主要包括填埋、焚烧两

大类。填埋法占用大量土地资源,选址要求较高,且极易引起地下水污染、空气污染以及病原菌扩散等二次污染问题,因而在国内外逐渐受到限制。英国的污泥填埋比例由1980年的27%下降到2005年的6%^[5];此外,我国发改委、住建部、生态环境部联合印发了《城镇生活垃圾分类和处理设施补短板强弱项实施方案》,计划2023年基本实现垃圾零填埋。

焚烧处理可以快速有效实现污泥无害化、减量化,但污泥焚烧容易产生大量含有重金属、二氧化硫、氮氧化物、二噁英、呋喃等多种有毒物质的飞灰烟气,容易对环境造成二次污染,且烟气处理的设施成本高、难度较大。目前,我国采用焚烧法处理的污泥比例不足3%^[6],可见焚烧处理方法还未在我国污泥处理处置中普及。

因此,这些传统污泥处置方法尚不能妥善处理和处置城市污泥,随着研究的深入,能够带来环境和经济双重效益的污泥资源化利用技术逐渐受到青睐。

3 污泥资源化利用技术

目前污泥资源的再利用已经成为实现城市可持续发展的研究热点。按照应用领域的不同,污泥资源化利用技术主要可分为农业利用、能源利用、建材利用和环保利用四类。

3.1 堆肥

经过堆肥处理后的污泥,病原菌得以灭活,有机物发生腐殖质化,重金属迁移性降低^[7],氮、磷、钾养分充足,可作为一种高质、有效的有机营养肥料^[8]。但该技术对污泥品质的要求较高,核心污染物也从早期的重金属转变成各类难降解有机物,如残留药物、化学品、生物制品等^[9],需要规避二次污染问题。除化学风险外,污泥堆肥的微生物风险不容忽视^[10]。考虑到污泥存在的各种潜在风险,我国农业行业标准《有机肥料》(NY/T 525—2021)中禁用污泥生产农用有机肥,但可用其作为营养基质,在绿化园林、修复矿山、改良沙漠化土壤中发挥作用^[11]。

3.2 能源利用

污泥的能源化利用是借助生物、物理或热化学方法,制得氢、生物柴油、沼气、微生物燃料电池等能源产品^[12],有利于解决我国能源紧缺问题。

3.2.1 氢、生物柴油、沼气

生物制氢方式主要有微生物厌氧光合制氢和微生物厌氧发酵制氢,其中厌氧发酵制氢的有机物可利用性更高,工艺更简单、易操作^[13]。Guang YANG等^[14]研究发现,添加3种含碳量较高的林业废弃物作为共基质后,单一污泥的产氢量较未添加前提高了9.6~40.5 mL/g,同时,单独污泥发酵的挥发性固体(VS)去除率也提高了3.8%~15.2%,证明了污泥与林业废弃物共发酵提高产氢量和减少污泥量的可行性。

生物柴油的化学性质与商业柴油相似,因此需求量很大。原料成本是生物柴油商业化的主要障碍,而污泥正逐渐取代高成本的食用原料成为生物柴油的潜在原料。Fenfen ZHU等^[15]测定了北京地区3个典型污水处理厂的5个污泥样品的脂质含量,发现细胞脂质高于54%,是生产生物柴油的良好资源。

污泥沼气利用技术通过厌氧消化分解污泥中的有机质,得到甲烷等可能源利用的气体。目前国内外的研究重点是通过优化预处理技术和添加某些废弃物来提高甲烷产气率。邱春生等^[16]对污泥进行低温热碱处理,产气量比未预处理污泥的提高了83.7%。S. ANHURADHA等^[17]研究发现,蔬果废弃物和城市污泥厌氧共消化时的累积产气量较污泥单独厌氧消化高出28.53 L。另外,Yuansheng HU等^[18]研究发现,投加33 g/L废铁屑(8 mm×3 mm×0.5 mm)后,污泥厌氧消化系统获得25.3%的甲烷增量,每年可节省184万元,减少CO₂排量1 660 t,说明废铁屑与污泥协同厌氧消化可取得环境、经济和社会三重效益。

综上,污泥氢气利用、生物柴油利用是近几年的新兴技术,还处于技术研发阶段,而污泥沼气利用技术已经过大量研究,初步具备成为成熟产业的条件。

3.2.2 微生物燃料电池

微生物燃料电池(MFC)技术可直接将污泥有机物中的化学能转化为电能,达到污泥稳定化和资源化的目的。Hanmin ZHANG等^[19]研究发现,对于加入氧化石墨烯(GO)和还原氧化石墨烯(rGO)的污泥微生物燃料电池(SMFC),其污泥减量率较普通MFC的分别高出3、2.2倍,最大功率密度分别是普通MFC(31.19 mW/m³)的6.86、2.58倍。可见,GO和rGO具有破坏细胞和加速电子传输的作用,可以大大促进MFC的污泥减量和产电量。此外,在MFC的阳极添加废铁,可显著提高有机物的利用率、污泥减量率和产电率,反应时

间显著缩短,大幅降低成本^[20]。

3.3 建材利用

建材等行业的生产过程对黏土的需求量很大,导致黏土资源被大量开采,已严重影响农田的数量和质量。污泥中的主要氧化物为SiO₂(10%~25%)、Al₂O₃(5%~10%)和CaO(10%~30%),与黏土和硅酸盐水泥类似。且焚烧后污泥灰中的氧化物会增加10%~50%^[21]。可以利用污泥中的这些成分进行水泥、砖、陶粒等建筑材料的制作^[4]。

3.3.1 水泥

上海水泥厂通过污泥均化、贮存、碾碎、煅烧等步骤生产出符合国家标准的水泥熟料,且废气排放达到国家环保监测标准要求^[22]。Wei XU等^[23]研究发现,在石灰干化污泥中添加含钙的低密度聚乙烯(质量分数≤15%),在1 400 °C下可实现良好的熟料烧结性能,达到熟料质量标准要求,有效形成污水处理厂与水泥厂之间的可循环经济模式。

3.3.2 砖块

污泥制砖是污泥建材利用技术中一项有前景的新技术。制得的砖块质轻、多孔、隔音、隔热,高温烧制杀灭有害细菌,半成品留存了污泥中的重金属,成品无臭味^[24]。在大多数研究中,砖头混合料中污泥添加量的增加会导致抗弯强度降低,而适合的添加量会提高抗弯强度。例如,铁基污泥添加量低于10%(质量分数)时,与参考值相比,制得的陶瓷样品弯曲强度明显提高7%~97%^[25],其机械强度优于参考黏土砖^[26]。

3.3.3 陶粒

陶粒凭借坚硬、透水、质轻、保温等特点,在轻质混凝土、保温建筑材料等领域应用广泛^[27]。颜建等^[28]在剩余污泥量为20%、高岭土淤泥质量比为0:10、烧结温度为1 100 °C的条件下制备陶粒,浸出的重金属符合GB 5085.3—2007的要求,环境风险较低。

我国北京、重庆、上海、沈阳等地均进行过相应的生产性研究,但其投入运行面临着一定挑战,如污泥的物理化学性质易变,有机物含量相对较高,将增加建材的孔隙率和吸水率,对产品性能产生不利影响。

3.4 环保利用

污泥中含有大量有机物,可通过化学改性和高温碳化制得环保材料。目前污泥经环保利用得到的产品主要有污泥制生物炭、可降解塑料、生物絮凝剂等。

3.4.1 生物炭

生物炭吸附因易操作、效果好,广泛应用于水处理领域。然而,商品生物炭的原料主要为煤和木材等,大规模应用受到限制。采用城市污泥热解制备的生物炭具有丰富的孔隙结构和表面官能团,以及较大的比表面积,去除废水中的抗生素、重金属离子、有机污染物、染料时效果显著^[29]。

污泥生物炭的制备主要有直接碳化法、活化法、催化活化法、添加碳源法等。其中直接碳化法和物理活化法效果略差,未被广泛使用。催化活化法的研究目前主要集中在铁基催化活化方面^[30]。添加碳源法对于提高产品的比表面积效果明显,吸附性能大幅提高^[31]。

目前的研究主要通过添加活化剂和改性剂来提高污泥生物炭的吸附性能^[32-34]。Yili LI等^[33]将玉米秸秆和污泥同时碳化,在玉米秸秆投加量为25%、600℃活化1h的条件下,用4mol/L ZnCl₂活化制备了污泥生物炭,其比表面积达到769m²/g,对亚甲基蓝的吸附效果与商品生物炭的相当,但生产成本便宜。但化学活化能耗大,设备易腐蚀,后续处理工艺繁琐,其二次污染问题也值得关注^[34]。

王超前等^[35]提出污泥微波诱导协同热解制备生物炭的技术思路,该技术不仅固化重金属效果、固碳效果及孔隙结构更好,且与常规热解60min的制炭工艺相比,节能省时一半以上,为低能耗高效制备优质生物炭的实际应用奠定了基础。

Zedong LU等^[36]对生物炭吸附性能主要由微孔和部分中孔孔容积决定的传统认识进行了补充,通过生物炭过滤器245d的平行运行,并基于宏基因组学和宏蛋白质组学的分析,提出生物炭微孔和微米级大孔的孔容积是决定生物炭吸附性能和生物再生作用的重要指标。这一研究为给水处理中生物炭的合理选择和应用提供了很好的方向。

3.4.2 可降解塑料

传统塑料难降解,易引发环境污染。研究表明,有490~1270万t塑料汇入海洋,预计到2025年将增长10倍^[37]。近年来,生物降解塑料的研究引起人们广泛关注。污泥中存在大量细菌,能够储存羟基脂肪酸酯(PHA),通过添加碳源和无机盐培养基,可以制备可降解塑料。T. PALMEIRO-SÁNCHEZ等^[38]研究发现,中试规模下活性污泥中的PHA含量占污泥有机质的66%,

且利用活性污泥制备PHA的产率与纯菌发酵的产率相差无几,富含营养物质的活性污泥既可作为菌种来源,又可作为底物给微生物生长繁殖提供营养物质。

3.4.3 生物絮凝剂

城市污泥中的微生物含有大量多醌、蛋白质、纤维素等成分,其具有絮凝活性,可用来制备生物絮凝剂。利用污泥制生物絮凝剂,不但可解决生物絮凝剂成本高的问题,还能实现污泥资源化利用。王聪等^[39]探究了超声波法、碱解法和冻融法制得的生物絮凝剂的性能,发现碱解法制备的絮凝剂絮凝率可达97.89%,且絮凝活性最高,在相同能耗下絮凝剂产量最多。

综上,污泥环保利用既能实现污泥资源化的目标,又可解决环境污染问题,具有很好的市场价值,有待进一步深入研究。

4 总结和展望

城市污泥的处置方法及其工艺多种多样。此前,我国大多城市主要采取填埋和焚烧的处置方式,而由于填埋占用大量土地资源,还面临二次污染问题,已被逐步摒弃。焚烧处理虽然具有很好的减量化、无害化效益,但白白损失其中的可利用资源。因此,大力发展污泥的资源化处置技术,促进城市污泥等固废的资源化利用,将是今后的发展方向,这对于我国城市生态系统健康和可持续发展尤为重要。

污泥堆肥是美国、欧洲、澳大利亚等国家或地区目前常用的资源化利用技术。尽管相关国家已多次提高污泥堆肥作为有机肥应用的污染控制标准,但由于存在潜在的长期污染风险而一直备受争议。污泥虽不能作为有机肥直接施用,但我国存在大量土壤荒漠化严重的地区、植物营养元素贫乏的矿山环境等,大量污泥营养土正好可满足其环境生态修复的需要。

污泥建材化利用是一项非常有潜力的新技术,能在达到污泥减量化的同时减缓黏土资源的消耗。虽然该技术存在材料强度低、稳定性差的问题,但随着相关技术与工艺研究的深入,未来将成为污泥资源化利用的主流方向之一。

污泥的能源化利用可回收氢气、生物柴油、沼气等生物质能以及电能,减少污水处理厂能耗,降低对环境的影响,实现污泥处置的减量化、无害化、资源化。其中除污泥沼气利用技术发展历史较长、技术相对成熟,可实现工程应用外,其他技术尚存在产量偏低、残渣处理过程易造成污染等诸多关键问题和

工程技术问题,其商业化应用还有很长的路要走。

污泥环保利用制成的生物炭、生物絮凝剂等环保材料,可作为净化水体的吸附和絮凝材料,形成“以废治废”的生态链,而制成的可降解塑料可以代替传统塑料,减少“白色污染”。其中,污泥生物炭利用技术在园林绿化、作物种植^[40]、水污染和气体污染治理方面具有可观效益,具有较好的应用前景,成为近几年的研究热点。

综上所述,污泥堆肥技术、污泥建材利用技术、污泥沼气利用技术及污泥生物炭利用技术具有广阔的应用前景,有望成为未来污泥资源化利用的主流方向。未来在提升相关产品产量和性能的同时,还应着重处理制作过程产生的残渣或有毒有害气体,规范污泥处理行业标准,避免二次污染。并加大相关资源化设备优化的研发力度,降低投资及运营成本,使污泥资源化利用真正达到技术可行,经济合理。

参考文献

- [1] 曹斌. 城市污泥的特性及资源化利用技术研究进展[J]. 环境与发展, 2020, 32(8): 104.
CAO Bin. Research progress on the characteristics of municipal sludge and its resource utilization technology[J]. Environment and Development, 2020, 32(8): 104.
- [2] 蔡清谊. 城市污泥资源化利用途径及发展方向[J]. 节能与环保, 2020(7): 41-42.
CAI Qingyi. Approaches and development direction of municipal sludge resource utilization[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2020(7): 41-42.
- [3] YANG Yi, OK Y S, KIM K H, et al. Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants: A review[J]. Science of the Total Environment, 2017, 596/597: 303-320.
- [4] 谢昆, 尹静, 陈星. 中国城市污水处理工程污泥处置技术研究进展[J]. 工业水处理, 2020, 40(7): 18-23.
XIE Kun, YIN Jing, CHEN Xing. Research progress on sludge treatment technology of urban sewage treatment project in China[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(7): 18-23.
- [5] 章金骏. 污泥烧制陶粒的技术路径与控制因子研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
ZHANG Jinjun. Characteristics and sintering technology of sewage sludge ceramics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [6] 刘莹. 城市污水处理厂污泥处理处置现状与技术研究[J]. 节能与环保, 2019(1): 78-79.
LIU Ying. Present situation and technology of sludge treatment and disposal in municipal sewage treatment plant[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2019(1): 78-79.
- [7] RADZIEMSKA M, GUSLATIN Z M, BES A, et al. Can the application of municipal sewage sludge compost in the aided phytostabilization technique provide an effective waste management method?[J]. Energies, 2021, 14(7): 1984.
- [8] 牛国祥, 朱豪, 姚雨伽, 等. 污泥堆肥工艺及其应用前景[J]. 广东化工, 2020, 47(11): 142-143.
NIU Guoxiang, ZHU Hao, YAO Yujia, et al. Sludge composting process and application prospect[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(11): 142-143.
- [9] 单灵婕, 王松林, 孙渝波, 等. 污泥处理处置现状分析与资源化利用研究[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(12): 192-194.
SHAN Lingjie, WANG Songlin, SUN Yubo, et al. Analysis of sludge treatment and disposal status and study on resource utilization[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(12): 192-194.
- [10] MAJOR N, SCHIERSTAEDT J, JECHALKE S, et al. Composted sewage sludge influences the microbiome and persistence of human pathogens in soil[J]. Microorganisms, 2020, 8(7): 1020.
- [11] KRANZ C N, MCLAUGHLIN R A, JOHNSON A, et al. The effects of compost incorporation on soil physical properties in urban soils-A concise review[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 261: 110209.
- [12] 刘恒嘉, 马闯, 刘永丽, 等. 污泥的能源化利用研究进展[J]. 化工新材料, 2013, 41(9): 8-10.
LIU Huanjia, MA Chuang, LIU Yongli, et al. Research of energy utilization of sewage sludge[J]. New Chemical Materials, 2013, 41(9): 8-10.
- [13] 栗志翔. 市政污泥的处置及资源化利用综述[J]. 科技风, 2021(7): 121-122.
LI Zhixiang. Review on disposal and resource utilization of municipal sludge[J]. Technology Wind, 2021(7): 121-122.
- [14] YANG Guang, WANG Jianlong. Enhanced hydrogen production from sewage sludge by co-fermentation with forestry wastes[J]. Energy & Fuels, 2017, 31: 9633-9641.
- [15] ZHU Fenfen, WU Xuemin, ZHAO LuYao, et al. Lipid profiling in sewage sludge[J]. Water Research, 2017, 116: 149-158.
- [16] 邱春生, 杜广春, 骆尚廉, 等. 预处理方式对剩余污泥水解及厌氧产甲烷性能的影响[J]. 环境工程, 2016, 34(3): 133-136.
QIU Chunsheng, DU Guangchun, LUO Shanglian, et al. Effects of different pretreatment of excess sludge on its hydrolysis and anaerobic methane production[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(3): 133-136.
- [17] ANHURADHA S, ARRRIVUKKARASAN S. Potentiality of fruit and vegetable waste by anaerobic co-digestion with municipal sewage sludge and biogas yield[J]. AIP Conference Proceedings, 2020, 2225(1): 070003.
- [18] HU Yuansheng, HAO Xiaodi, ZHAO Dan, et al. Enhancing the CH₄ yield of anaerobic digestion via endogenous CO₂ fixation by exogenous H₂[J]. Chemosphere, 2015, 140: 34-39.
- [19] ZHANG Hanmin, DA Zongyang, FENG Yujie, et al. Enhancing the electricity generation and sludge reduction of sludge microbial

- fuel cell with graphene oxide and reduced graphene oxide [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186: 104–112.
- [20] CAI Lu, ZHANG Hanmin, FENG Yujie, et al. Iron and carbon granules added to anode enhanced the sludge decrement and electrical performance of sludge microbial fuel cell [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 372: 572–580.
- [21] CHANG Zhiyang, LONG Guangcheng, ZHOU J L, et al. Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 154: 104606.
- [22] 赵玉鑫, 刘颖杰. 城市污泥处理技术及工程实例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2016: 150–155.
- [23] XU Wei, XU Jingcheng, LIU Jia, et al. The utilization of lime-dried sludge as resource for producing cement [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 83: 286–293.
- [24] 周天水, 崔荣煜, 王东田, 等. 市政污泥和工业污泥资源化处置利用技术 [J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(S2): 251–255.
- ZHOU Tianshui, CUI Rongyu, WANG Dongtian, et al. Resource utilization and disposal technology of municipal and industrial sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(S2): 251–255.
- [25] KIZINIEVIČ O, ŽURAUSKIENĖ R, KIZINIEVIČ V, et al. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 41: 464–473.
- [26] WOLFF E, SCHWABE W K, CONCEIÇÃO S V. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 96: 282–289.
- [27] 万琼, 韩庆吉, 张新艳, 等. 以给水厂污泥制备新型陶粒及其性能优化 [J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(4): 1228–1236.
- WAN Qiong, HAN Qingji, ZHANG Xinyan, et al. Preparation and performance optimization of ceramsites using waste sludge [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(4): 1228–1236.
- [28] 颜建, 裴启梦. 城市河道污泥处置关于污泥制陶粒性能研究 [J]. *江苏水利*, 2019(1): 43–47.
- YAN Jian, PEI Qimeng. Study on the performance of sludge ceramist in urban river sludge disposal [J]. *Jiangsu Water Resources*, 2019(1): 43–47.
- [29] 王静松, 刘杰, 唐蕾. 污泥基生物炭在水处理中的应用 [J]. *化工管理*, 2020(7): 113–114.
- WANG Jingsong, LIU Jie, TANG Lei. Application of wasted sludge-based biochar in water treatment [J]. *Chemical Enterprise Management*, 2020(7): 113–114.
- [30] 刘琛, 蒋文举, 王娟, 等. 软锰矿-污泥基活性炭对活性艳红 X-3B 的吸附特性研究 [J]. *林产化学与工业*, 2009, 29(4): 37–40.
- LIU Chen, JIANG Wenju, WANG Juan, et al. Study on dye adsorptive characteristics of activated carbons from pyrolusite-added sewage sludge [J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2009, 29(4): 37–40.
- [31] REN Xiaoli, LIANG Baohong, LIU Min, et al. Effects of pyrolysis temperature, time and leaf litter and powder coal ash addition on sludge-derived adsorbents for nitrogen oxide [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 125: 300–304.
- [32] WANG Laifu, WANG Yan, LIAN Jingyan. Preparation of the sludge activated carbon with domestic sludge mixed agricultural straw [C]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 167(1): 2004.
- [33] LI Yili, LI Yanling, LI Liping, et al. Preparation and analysis of activated carbon from sewage sludge and corn stalk [J]. *Advanced Powder Technology*, 2016, 27(2): 684–691.
- [34] PIETRZAK R, NOWICKI P, KAŻMIERCZAK J, et al. Comparison of the effects of different chemical activation methods on properties of carbonaceous adsorbents obtained from cherry stones [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2014, 92(6): 1187–1191.
- [35] 王超前, 王文龙, 李哲, 等. 基于微波诱导定向加热的污泥新型热解方法能耗分析 [J]. *化工学报*, 2019, 70(S1): 168–176.
- WANG Chaoqian, WANG Wenlong, LI Zhe, et al. Energy consumption analysis of novel pyrolysis method of sewage sludge based on microwave-induced target-oriented heating [J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(S1): 168–176.
- [36] LU Zedong, SUN Wenjun, LI Chen, et al. Effect of granular activated carbon pore-size distribution on biological activated carbon filter performance [J]. *Water Research*, 2020, 177: 115768.
- [37] BORRELLE S B, ROCHMAN C M, LIBOIRON M, et al. Opinion: Why we need an international agreement on marine plastic pollution [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(38): 9994–9997.
- [38] PALMEIRO-SÁNCHEZ T, FRA-VÁZQUEZ A, REY-MARTÍNEZ N, et al. Transient concentrations of NaCl affect the PHA accumulation in mixed microbial culture [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 306: 332–339.
- [39] 王聪. 剩余污泥制备生物絮凝剂及其在油田采出水处理中的应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- WANG Cong. Preparation of bioflocculant by remaining sludge and their application in oilfield produced water treatment [D]. *Dalian: Dalian University of Technology*, 2016.
- [40] FACHINI J, COSER T, SILVA DE ARAUJO A, et al. One year residual effect of sewage sludge biochar as a soil amendment for maize in a Brazilian oxisol [J]. *Sustainability*, 2021, 13(4): 2226.
-
- [作者简介] 李玉双 (1978—), 博士, 教授, 硕士生导师, E-mail: ysls_sy@163.com. 通讯作者: 魏建兵, 博士, 教授, E-mail: oliver1208@sina.com.
- [收稿日期] 2022-10-01 (修改稿)