

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.10.004

城镇污泥产品林地利用指南解读及技术应用

姚大伟¹, 崔超¹, 张立秋², 熊建军¹, 孙德智², 杜子文²,
杨文彬¹, 高始涛¹

(1. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044; 2. 北京林业大学 环境科学与工程学院,
北京 100083)

摘要: 为促进城镇污泥产品林地利用规范发展, 中国环境科学学会批准发布了团体标准《城镇污水处理厂污泥产品林地利用工程化施用技术指南》(T/CSES 28—2021), 并于2021年7月15日正式实施。介绍了该指南的编制背景、制定原则、主要技术内容, 详细阐述了关键技术说明, 并通过北京地区污泥产品林地资源化应用案例, 解析了指南中主要技术参数的操作方法。T/CSES 28—2021是以城镇污泥产品林地利用实用性为目的对现行国家及行业标准、指南、政策等文件的补充与完备, 执行过程互不冲突。该指南对城镇污泥产品林地利用管理过程进行了全面梳理和总结, 有利于提高我国污泥产品林地利用的规范性, 推动并保障我国城镇污泥产品安全资源化利用工作的科学发展。

关键词: 城镇污泥产品; 林地利用; 指南; 技术案例

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)10-0021-07

Interpretation and Technical Application of Technical Guideline for Engineering Application of Sewage Sludge Product from Municipal Wastewater Treatment Plant in Forest Land Use

YAO Da-wei¹, CUI Chao¹, ZHANG Li-qiu², XIONG Jian-jun¹, SUN De-zhi²,
DU Zi-wen², YANG Wen-bin¹, GAO Shi-tao¹

(1. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100044, China; 2. College of Environmental Science & Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To promote the standardized development of urban sludge product forest land utilization, the Chinese Society for Environmental Sciences had approved and issued the group standard *Technical Guideline for Engineering Application of Sewage Sludge Product from Municipal Wastewater Treatment Plant in Forest Land Use* (T/CSES 28-2021), which was officially implemented on July 15, 2021. This paper introduced the compilation background, formulation principles, and main technical content of the guideline. It elaborated on key technical descriptions and analyzed the operation methods of the main technical parameters of the guideline through the application case of forest land resource utilization of sewage sludge product in Beijing. With the aim of enhancing the practicability of sewage sludge product in forest land use, this guideline is a supplement and completeness to current national and

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07301007)

通信作者: 熊建军 E-mail: xiong198282@sina.com

industry standards, guidelines, policies and other documents with not conflicting during the implementation process. In summary, the guideline provides a comprehensive overview of the management process for sewage sludge product in forest land use. This will help enhance the standardization of sewage sludge product in forest land use, and ensure the scientific development of safe resource utilization of sewage sludge products in China.

Key words: sewage sludge product; forest land use; guideline; technical case

城镇污水处理厂污泥(以下简称“城镇污泥”)具有营养资源和环境污染的双重属性^[1-3],其处置问题一直是行业关注的重点。当前我国城镇污泥处置方式呈现因地制宜的多元化态势^[4-7],而经减量化、无害化、稳定化后的达标污泥产品土地利用是以资源价值为导向^[8],实现“变废为宝”的一种有效处置方式,也是“双碳”背景下污泥处置的优选路线^[9]。林地利用作为污泥土地利用方向的形式之一,具有环境容量大、施用范围广等优势^[10-13],但是现行污泥产品林地利用标准主要侧重泥质管理,对应用单位实施过程的安全、规范指导存在局限性。

为解决污泥产品林地利用过程中存在的集成技术缺乏、环境风险管理体系缺失等问题^[14],以当前城镇污泥林地及相关土地利用标准为基础,从过程安全、使用规范、科学施用的角度,中国环境科学学会组织编制了《城镇污水处理厂污泥产品林地利用工程化施用技术指南》(T/CSES 28—2021,以下简称《指南》),并于2021年7月15日正式颁布实施。

1 编制背景

住房和城乡建设部发布的《中国城市建设统计年鉴》(2020)显示,2020年全国年污泥产量约6 000×10⁴ t(以含水率为80%计)。污泥产量逐年上升带来的污泥处理处置问题日益严重,对污泥处理处置工作造成了严重负担。土地利用被认为是城镇污泥资源化处置的有效手段,其中污泥林地利用因其消纳污泥量大、环境危害传播风险低等优势得到广泛应用^[10-13]。然而,从国务院、财政部、生态环境部、住房和城乡建设部、国家发展和改革委员会等官方网站中检索发现,1984年—2018年共发布68份污泥处理处置相关文件,其中与污泥林地利用有关的文件包括《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)、《城镇污水处理厂污泥处置 林地用泥质》(CJ/T 362—2011)、《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》(GB/T 24600—2009)

和《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》(CJ/T 309—2009)等泥质标准,这些标准重点标定了污泥理化性质及污染物等泥质指标。2013年,浙江省质量技术监督局发布《污泥土地利用技术规范》(DB 33/T 891—2013),但该规范仅规定了污泥林地利用泥质、施用年限等。2018年,北京市市场监督管理局发布《园林绿化用地土壤质量提升技术规程》(DB 11/T 1604—2018),该规程对污泥林地利用流程和污泥泥质标准进行了规范,而且对土壤调查、场地踏勘、土壤样品采集及检测等方面进行了相关说明。

然而,上述规范标准对污泥林地利用的施用要求、标准推荐用量的安全用量核算、施用年限、施用风险及施用前后全流程监管等方面未进行系统说明,但是2020年新版《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》对城镇污泥全流程监督管理提出了更高要求。因此,我国完整性污泥林地利用工程应用技术指导文件的缺乏制约了污泥林地利用的规范化发展,制定污泥林地利用的相关技术规范和技术指南迫在眉睫。

基于城镇污泥产品林地利用工程化施用基本作业流程,结合现有相关法律、法规和标准,构建污泥产品林地利用工程化施用技术指南,使污泥产品能够安全、合理地施用于林地,为污泥产品林地利用提供技术指导,对于污泥产品林地工程化施用和环境风险评价具有重要意义。

2 编制原则

在充分总结和比较国内外污水处理厂污泥土地利用标准、规范、技术指南,调研污泥产品制作工艺、流程的基础上,借鉴北京排水集团编撰的《城镇污水处理厂污泥产品林地施用技术规程》(Q/BDG 43046—2019),以及《城镇污水处理厂污泥处置 林地用泥质》(CJ/T 362—2011)、《城镇污水处理厂污泥应用于园林绿化的技术要求》(DB 31/T 403—

2008)、《园林绿化用地土壤质量提升技术规程》(DB 11/T 1604—2018)等标准中的有关内容,参考《标准化工作导则 第1部分:标准的结构和编写》(GB/T 1.1—2009)相关规定进行《指南》的编制。

2.1 通用性原则

《指南》中的污泥产品适用于成片的天然林、次生林和人工林覆盖的土地,包括用材林、经济林、薪炭林和防护林等各种林木的成林、幼林和苗圃等所占用的土地,通用性较高。

2.2 指导性原则

《指南》中污泥产品的运输方式、施用量、施用季节、施用频次、施用方式、施用作业要求、作业流程、林木生长评价、环境检测评价及记录、存档、报送等完整施肥作业流程,已经过示范与实践,可用于指导污泥林地利用实际工程。

2.3 协调性原则

《指南》与现有标准、规范、指南协调统一,互不交叉,仅作为一种实用型、适用性技术规范对目前的标准、规范、指南进行补充与完备。

2.4 适用性原则

《指南》规定的污泥产品充分考虑了现有常用污泥产品制备工艺,具有普遍适用性。

3 主要技术内容

《指南》共分为六章,规定了城镇污水处理厂污泥产品制备后林地施用的流程及技术要点,内容包括适用范围、规范性引用文件、术语与定义、总体要求、运输方式、施用量、施用时间、施用频次、施用方式、施用作业要求、林木生长监控、环境监测及记录与存档等环节。

4 关键技术说明

4.1 施用区域选择

根据《中华人民共和国土壤污染防治法》相关原则,基于污泥产品有机质、氮、磷等营养成分含量高而具有改善土壤质量的特点,宜优先选择平原地区土壤贫瘠、质地差的林地作为污泥产品施用区。根据施用区坡度,选择合适的施用方式。当施用场地坡度<9%时,宜采用撒施方式;当场地坡度为9%~18%时,宜采用横向沟施等方式,开沟方向垂直于地表径流方向,以防止雨水冲刷和地表径流对地表水及附近环境产生影响;当场地坡度为18%~46%时,宜采取穴施、基质棒插施、增加覆土厚度等

方式进行污泥产品施用;当场地坡度>46%时,场地属于水土流失敏感区,不得施用污泥产品。

4.2 污泥产品质量要求

根据《城镇污水处理厂污泥处置 林地用泥质》(CJ/T 362—2011)相关规定,林地施用的城镇污泥产品出厂前应做好检测且需满足污泥产品林地利用泥质。

4.3 最大安全施用量核算

污泥产品施用量的确定原则是在保证污泥中污染物不影响环境的前提下,充分利用污泥产品中的营养成分,其实质是限定污泥中污染物的输入量。污泥产品年施用量的限定值为施用区当年施用污泥产品质量的上限值,依据土壤背景值、《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)规定的土壤污染物的风险筛选值及污泥产品中污染物的含量进行计算,计算公式如下:

$$S_i = (W_i - B_i) / C_i \times T \quad (1)$$

式中: S_i 为第*i*种污染物的污泥产品施用量限定值, $t/(hm^2 \cdot a)$; i 为GB 15618—2018中规定的各类重金属污染物和苯并[a]芘; W_i 为污染物*i*的风险筛选值, mg/kg ; B_i 为土壤中污染物*i*的背景值, mg/kg ; C_i 为污泥干基中污染物*i*的含量, mg/kg ; T 为污泥产品施用层的土壤干质量, $t/(hm^2 \cdot a)$,其中采用撒施时,施用层指土壤地表至翻耕深度之间的土壤层,采用沟施或穴施时施用层指土壤地表至开沟或挖穴深度之间的土壤层。

若 S_i 中最大值小于 $30 t/hm^2$ 时,则将该最大值作为污泥产品年施用量的限定值;若 S_i 中最小值大于 $30 t/hm^2$ 时,则将污泥产品年施用量的限定值设定为 $30 t/hm^2$ 。若对同一地区连续多年施用污泥产品时,每次施用前均应再次检测土壤和污泥产品中各类污染物含量,按照式(1)重新计算确定年施用量限定值。

4.4 施用频次、年限及时间

城镇污泥产品的施用频次可一年一次或一年多次,但总量不得超过年施用量限定值。依据《城镇污水处理厂污泥处置 林地用泥质》(CJ/T 362—2011)规定,连续施用年限不得超过15年。参考《城镇污水处理厂污泥应用于园林绿化的技术要求》(DB 31/T 403—2008)及《污泥土地利用技术规范》(DB 33/T 891—2013),并充分考虑南北方差异,北

方地区宜在春夏季节施用,汛期施用时应注意防范水土流失和地表径流对周边水体造成的影响;南方地区宜在秋冬季节施用,避免在梅雨季节或炎热天气施用。在土壤被雨水浸润、雪覆盖、冰冻期间,则不宜施用污泥产品。

4.5 施用流程

污泥产品林地利用的作业流程见图1。

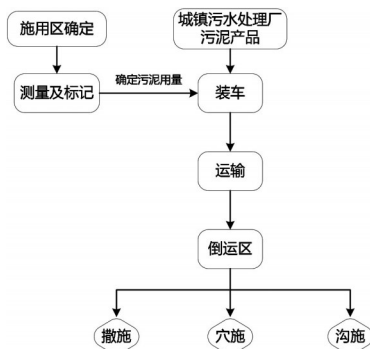


图1 城镇污泥产品林地利用的作业流程

Fig.1 Operation process of sewage sludge products in forest land use

4.6 施用要求

根据示范区建设经验,在满足相关坡度要求的条件下,对于面积较大且易机械化作业的林地,宜采用撒施方式,撒施时应避免地表裸露和扬尘污染,施用后应立即旋耕。对于场地条件难以机械化作业或雨水冲刷时易发生地表径流的林地,宜采用沟施或穴施方式。沟施时,应在距离树木主干80~100 cm位置开挖宽约30 cm、深30~50 cm的施肥沟,施用污泥产品后立即覆土,覆土厚度不得低于20 cm;穴施时,应在距离树木主干80~100 cm处开挖施肥穴,一般穴深5~10 cm,污泥产品施用穴中后覆盖土壤。

4.7 记录要求

《指南》要求施用城镇污泥产品时,需对污泥产品的泥质、运输量、施用量、施用时间、施用频次和施用方式等进行详细记录,并及时记录施用区林木生长状况和施用区土壤、地下水和地表水的监测结果。

4.8 监测要求

《指南》对采样指标及方法、污染物含量限值进行了规定,以防污泥产品施用对地表水、地下水及土壤造成污染。同时还规定了施用区地下水的监测指标、监测频次和监测点位的布设要求。

5 北京污泥产品林地利用技术参数解析

《指南》重点关注的技术参数包括实施地调查、污泥产品施用可行性分析、污泥产品运输监管、污泥产品林地利用施工、施用后跟踪监测及记录存档等过程的全链条管理。以北京中心城区高级厌氧消化污泥产品在林地利用的具体实践,解析《指南》中主要技术参数要求的具体应用方法。

5.1 实施地调查分析

案例地点位于北京市大兴区某平原造林工程林地,该地块为拆迁后改造林地。通过场地调查,该地块为砂质土壤,土层适中,杂物多、养分低,土壤肥力贫瘠(见表1),土壤污染物含量(见表2)远低于《土壤环境质量农用地 土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)风险筛选值要求,且实施地点远离水源保护区。该地块坡度<9%,地表径流产生风险低,宜选择撒施翻耕方式。地块中树木排列整齐,树木间距3~4 m,适于机械作业,树种为白蜡、刺槐、旱柳,其中白蜡种植密度为900株/hm²,平均树高5.75 m,平均胸径5.76 cm,蓄积量14.54 m³/hm²;刺槐种植密度为850株/hm²,平均树高9.68 m,平均胸径12.21 cm,蓄积量31.51 m³/hm²;旱柳种植密度为825株/hm²,平均树高6.41 m,平均胸径11.11 cm,蓄积量18.37 m³/hm²。场地内林木生长状况良好,无明显病虫害。

表1 项目地土壤理化指标背景值

Tab.1 Background values of soil physical and chemical indicators in the project site

土壤理化指标	pH	容重/(g·cm ⁻³)	全氮/(g·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	有效磷/(g·kg ⁻¹)	速效钾/(g·kg ⁻¹)	盐分/(mS·m ⁻¹)	阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)
背景值	8.72	1.24	1.27	8.47	6.64	103.8	21.38	8.86

表2 项目地污染物指标背景值

Tab.2 Background values of pollutant indicators in the project site

污染物指标	全镉	全铬	全铅	全汞	全砷	全铜	全锌	全镍	苯并[a]芘
土壤背景值	0.11	38.55	18.43	0.04	3.54	18.67	54.37	18.19	<0.005
GB 15618—2018	0.6	250	170	3.4	25	100	300	190	0.55

5.2 污泥产品施用可行性分析

5.2.1 污泥产品质量对标可行性分析

污泥产品林地应用标准对标见表3。

表3 污泥产品林地应用标准对标

Tab.3 Benchmarking of forest land use standards for sludge products mg·kg⁻¹

检测指标	全镉	全铬	全铅	全汞	全砷	全铜	全锌	全镍	苯并[a]芘
污泥产品	0.916	80.09	17.52	8.07	2.81	190.6	533	20.96	0.05
CJ/T 362—2011	<20	<1 000	<1 000	<15	<75	<1 500	<3 000	<200	<3

由表3可知,污泥产品中重金属及苯并[a]芘指标满足《城镇污水处理厂污泥处置 林地用泥质》(CJ/T 362—2011)标准中的施用要求,由此判定污泥产品符合林地利用要求。

5.2.2 土壤环境容量分析

根据翻耕深度,0~20 cm 表层土壤单位土地面积质量约2.25×10⁶ kg/hm²,参照《土壤环境质量农

地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)风险筛选值,利用污泥产品污染物浓度和土壤背景值计算污泥产品施用量限定值,结果见表4。由表4可知,重金属汞是限制污泥产品施用的最大风险元素,其施用量最大为936.8 t/hm²,根据《指南》用量的判定要求,项目确定30 t/hm²为污泥产品年施用量的限定值。

表4 项目地不同污染物环境容量施用限值

Tab.4 Application limits of different pollutant environmental capacity in the project site t·hm⁻²

污染物类别	全镉	全铬	全铅	全汞	全砷	全铜	全锌	全镍	苯并[a]芘
污泥产品最大施用量(干基)	1 203.6	5 940.3	19 465.3	936.8	17 183.3	960.1	1 036.9	18 443.3	24 525.0

5.3 污泥产品运输监管

采用污泥产品运输专用车辆,车辆加装GPS,全程记录运输路线及目的地,保障运输过程无遗漏、扬撒、乱倾倒等问题,并留存电子记录资料。

5.4 污泥产品林地利用施工

通过场地调研,项目实施林地拆迁后改造平原造林工程地块,场地坡度小于9%,树木成行成列,面积较大,易进行机械化作业,污泥产品运输到位后选择撒施方式进行平铺翻耕,翻耕深度为地表以下20 cm,施用后立即旋耕(见图2),以达到均匀混合的目的,翻耕结束后由林地养护方进行正常养护作业。



图2 污泥产品林地利用现场

Fig.2 Forest land use site of sludge products

5.5 跟踪监测

5.5.1 土壤跟踪监测

林地施用一年后,由第三方检测单位进行施用

地土壤样品的采集和检测,分析土壤理化指标变化,以评估施用前后土壤重金属等污染物的环境状况。检测结果(见表5)表明,污泥产品施用后改善了土壤pH,有机质较施用前增加380%、全氮增加153%、有效磷增加1 001%、速效钾增加184%、阳离子交换量增加122%、盐分增加31.1%。总体来看,污泥产品土地利用对土壤培肥效果显著。

表5 污泥产品施用一年后的土壤理化指标

Tab.5 Physical and chemical indicators of soil one year after application of sludge products

理化指标	pH	容重/(g·cm ⁻³)	全氮/(g·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	盐分/(mS·m ⁻¹)	阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)
数值	8.26	1.25	3.21	40.69	73.12	294.29	28.03	19.69

污泥产品施用一年后土壤中各类污染物监测数据如表6所示。

表6 污泥产品施用一年后土壤中的污染物含量

Tab.6 Pollutant contents of soil one year after application of sludge products mg·kg⁻¹

指标	全镉	全铬	全铅	全汞	全砷	全铜	全锌	全镍	苯并[a]芘
数值	0.1	41.64	15.89	0.25	4.86	34.46	63.1	19.42	<0.005

由表6可知,土壤中8项重金属指标和苯并[a]芘均满足且远低于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)风险筛选值,土壤环境良好。若考虑该地块连年施用,则应重点关

注重金属汞,每次施用前均应再次检测土壤和污泥产品中各类污染物含量,计算确定年施用量限定值。

5.5.2 林木生长指标监测

在污泥产品施工结束后进行林木生长指标调查,根据树种、树龄、是否施用污泥产品等综合因素选取样地,样地大小为20 m×20 m。对施用污泥产品的林地进行林木生长指标的测定,与同龄同树种未施用样地的林木生长指标进行对比,测量林木的树高、胸径、冠幅(东南、西北),每块样地钻取6根年轮条,并抽样测量30根三级枝的枝条长度,具体测量数据见表7。

表7 施用与未施用污泥产品的各树种生长指标对比

Tab.7 Comparison of growth indicators of various tree species with and without application of sludge products

地点	树种	污泥产品施用情况	样地株数/(株·hm ⁻²)	观测数/株	平均树高/m	平均胸径/cm	平均冠幅/m	平均三级枝长/cm
大兴	刺槐	施用	700	28	9.55	11.51	3.93	33.43
		未施用	850	34	9.68	12.31	3.86	12.95
	白蜡	施用	700	28	7.61	13.84	4.65	18.08
		未施用	900	35	5.76	10.87	3.49	22.76
	旱柳	施用	700	27	8.44	12.28	3.77	35.29
		未施用	825	33	6.41	11.11	2.48	29.65

从结果来看,污泥产品施用一年对各个树种的树高影响不同,对旱柳、白蜡具有明显的正向作用,刺槐不显著。从林木的冠幅看,污泥产品施用地块与未施用地块相比具有显著的增幅效果。从三级枝的生长量来看,刺槐、旱柳效果显著,白蜡变化不显著。

综上所述,污泥产品施用与大部分树种的生长指标呈正相关,部分树种及指标差异不显著。在一年的施用监测周期内,污泥产品林地利用未对林木生长造成不良影响。

5.6 信息记录及统计

污泥产品林地施用评估整体结束后,采用GIS软件对施用地块数据信息进行录入。污泥产品施用信息GIS记录包括区、乡镇、村、施用地块编号、面积、土壤类型、施用单位、负责人及施用的时间、方式、数量、污泥种类和指标、土壤检测结果等,纸质文件存档,完成对施用地块记录备案,方便后续的跟踪监测和施用规划,达到项目可追溯目的。

6 结语

结合《城镇污水处理厂污泥产品林地利用工程化施用技术指南》(T/CSES 28—2021),对城镇污泥产品林地利用过程进行了全面梳理总结,重点介绍了污泥产品林地利用要求、安全用量核算评估方法、施用前后全流程监管等内容,并通过北京地区林地污泥产品应用案例的技术解析,介绍其对污泥产品林地利用的指导作用。《指南》为我国城镇污泥产品林地资源化的安全利用提供了技术支撑,其正式实施和应用将有利于提高我国污泥产品林地利用过程的规范性,也为行业内更为完善的指南、标准、规程等的建立、发布奠定基础,有助于推动并保障全国城镇污泥产品资源化安全利用工作的科学开展。

参考文献:

- [1] 戴晓虎. 我国污泥处理处置现状及发展趋势[J]. 科学, 2020, 72(6): 30-34.
DAI Xiaohu. Current status and development trend of sludge treatment and disposal in China [J]. Science, 2020, 72(6): 30-34 (in Chinese).
- [2] 梅晓洁, 唐建国, 张悦. 城镇污水处理厂污泥稳定化处理产物转化机理及可利用价值揭示[J]. 给水排水, 2018, 44(11): 11-19.
MEI Xiaojie, TANG Jianguo, ZHANG Yue. Transformation mechanism of the sludge stabilization process and the products value in municipal wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(11): 11-19 (in Chinese).
- [3] 马富亮, 孙昱, 彭祚登, 等. 城镇排水污泥制生物炭土在农林业中的应用研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2021(8): 117-123.
MA Fuliang, SUN Yu, PENG Zuodeng, et al. Research progress on application of biochar soil made from sewage sludge in agriculture and forestry [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2021(8): 117-123 (in Chinese).
- [4] 李雪怡, 梁远, 方小锋, 等. 北京市污泥处理处置现状总结分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(22): 38-42.
LI Xueyi, LIANG Yuan, FANG Xiaofeng, et al. Summarization and analysis of sludge treatment and disposal in Beijing [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(22): 38-42 (in Chinese).
- [5] 李尔, 曾祥英. 武汉市主城区污水厂污泥处理处置现状及展望[J]. 中国给水排水, 2021, 37(18): 8-13.

- LI Er, ZENG Xiangying. Current situation and prospect of sludge treatment and disposal of WWTPs in the main urban area of Wuhan [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(18): 8-13 (in Chinese).
- [6] 朱启凤, 吴雪, 张英, 等. 昆明市污泥处理处置现状及对策研究[J]. *给水排水*, 2021, 47(12): 20-25.
- ZHU Qifeng, WU Xue, ZHANG Ying, *et al.* Present situation and countermeasures of sludge treatment and disposal in Kunming City [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(12): 20-25 (in Chinese).
- [7] 蒋玲燕, 麦穗海. 上海市中心城区污水处理厂污泥特性及处理处置路线分析[J]. *给水排水*, 2015, 41(12): 30-34.
- JIANG Lingyan, MAI Suihai. Characterization and disposal of treated sludge from municipal wastewater treatment plants in central city of Shanghai [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 41(12): 30-34 (in Chinese).
- [8] 崔超, 白家云, 张晓娟, 等. 城镇生活污泥产品施用对小白菜肥效和土壤质量的影响[J]. *给水排水*, 2021, 47(S2): 86-93.
- CUI Chao, BAI Jiayun, ZHANG Xiaojuan, *et al.* Effects of application of domestic sewage sludge products on Chinese cabbage fertilizer efficiency and soil quality [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(S2): 86-93 (in Chinese).
- [9] 戴晓虎, 张辰, 章林伟, 等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J]. *给水排水*, 2021, 47(3): 1-5.
- DAI Xiaohu, ZHANG Chen, ZHANG Linwei, *et al.* Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(3): 1-5 (in Chinese).
- [10] 崔超, 马富亮, 杨文彬, 等. 污泥产品林地利用长期定位监测及土壤环境质量评价[J]. *给水排水*, 2020, 46(12): 36-40.
- CUI Chao, MA Fuliang, YANG Wenbin, *et al.* Long-term positioning monitoring and evaluation of soil environmental quality of sludge product forest land use [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(12): 36-40 (in Chinese).
- [11] 孙昱, 彭祚登, 熊建军, 等. 高级厌氧消化制污泥有机肥对油松和榆树林木生长及养分积累的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(10): 55-63.
- SUN Yu, PENG Zuodeng, XIONG Jianjun, *et al.* Effects of advanced anaerobic digestion sewage sludge as an organic fertilizer on growth and nutrient accumulation of *Pinus tabulaeformis* and *Ulmus pumila* [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, 39(10): 55-63 (in Chinese).
- [12] 贾清棋, 孙文彦, 姚聪颖, 等. 北京平原沙地油松银杏林施用污泥有机营养土重金属污染风险评价[J]. *新疆农业大学学报*, 2021, 44(2): 138-149.
- JIA Qingqi, SUN Wenyan, YAO Congying, *et al.* Risk assessment of heavy metal pollution by applying sludge organic nutrient soil to *Pinus Tabulaeformis* and *Ginkgo Biloba* forest on sandy land in Beijing plain [J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2021, 44(2): 138-149 (in Chinese).
- [13] 杨文彬, 王海东, 彭祚登, 等. 施用污泥制有机营养土对沙地国槐榆树林土壤理化性质的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(4): 559-566.
- YANG Wenbin, WANG Haidong, PENG Zuodeng, *et al.* Effect of the application of sludge organic nutrient soil on the physical and chemical properties of the soil of the *Sophora japonica* and *Ulmus pumila* forest in sandy land [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2021, 52(4): 559-566 (in Chinese).
- [14] 黄岚, 封莉, 杜子文, 等. 我国城市污泥土地利用瓶颈问题分析与对策研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(20): 31-36.
- HUANG Lan, FENG Li, DU Ziwen, *et al.* Analysis and countermeasures research on bottleneck problem of municipal sludge land application in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(20): 31-36 (in Chinese).

作者简介: 姚大伟(1981-), 女, 河北保定人, 硕士, 工程师, 研究方向为碳中和、污水和污泥处理及其资源化利用。

E-mail: yaodw@bdc.cn

收稿日期: 2022-05-06

修回日期: 2022-06-09

(编辑: 丁彩娟)