

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.01.009

基于环境容量的污泥产品土地安全施用量研究

崔超^{1,2}, 熊建军^{1,2}, 马富亮^{1,2}, 贾清棋^{1,2}, 白家云^{1,2}, 李海洋^{1,2},
杨文彬^{1,2}

(1. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044; 2. 北京北排水环境发展有限公司,
北京 100044)

摘要: 以北京的土壤重金属背景值、2021年中心城区污泥产品质量均值为基础,从环境管理的角度,通过对标法、静态环境容量法和动态环境容量法分析了采用不同方法核算的污泥产品最大安全施用量、优缺点以及土地利用防控要求。结果显示:污泥产品以对标法核算,符合林地、园林绿化、土地改良、农用B级用途,具体用量按对应标准执行。静态环境容量法不考虑重金属衰减,其一次最大安全施用量为830.9 t/(hm²·a),10、30、50 a周期的最大安全施用量分别为83.1、27.7和16.6 t/(hm²·a);动态环境容量法考虑重金属衰减,其5、10、30、50 a周期的最大安全施用量分别为247.3、163.6、118.3和114.7 t/(hm²·a)。基于环境容量法可知,北京地区污泥产品施用于土壤的重金属污染风险低、土地利用潜力大,重金属风险度依次为锌>汞>铜>镉>砷>铬>镍>铅。汞为安全风险防控关键元素,锌为生态风险防控元素。并提出了“以标准限值为底线,以环境容量为基线”的动态安全核算法,旨在指导不同土地利用方向的污泥产品施用。

关键词: 污泥产品; 土地利用; 对标法; 环境容量法; 安全施用量

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)01-0058-07

Land Safe Application Amount of Sludge Products Based on Environmental Capacity

CUI Chao^{1,2}, XIONG Jian-jun^{1,2}, MA Fu-liang^{1,2}, JIA Qing-qi^{1,2}, BAI Jia-yun^{1,2},
LI Hai-yang^{1,2}, YANG Wen-bin^{1,2}

(1. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100044, China; 2. Beijing North Drainage
Environment Development Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the soil background value of heavy metals in Beijing and the average quality of sludge products in central urban area in 2021, this paper analyzed the maximum safe application amount of sludge product, advantages and disadvantages of different calculation methods and the requirements of land use prevention and control by benchmarking method, static environmental capacity method and dynamic environmental capacity method from the perspective of environmental management. According to the benchmarking method, sludge products were suitable for forest land, landscaping, land improvement and agricultural level B purposes. The specific application amount should be implemented according to the corresponding standards. The static environmental capacity method did not consider the attenuation of heavy metals, the maximum safe application amount for one time was 830.9 t/(hm²·a), and

those for 10 years, 30 years and 50 years were 83.1 t/(hm²·a), 27.7 t/(hm²·a) and 16.6 t/(hm²·a), respectively. The dynamic environmental capacity method considered the attenuation of heavy metals, the maximum safe application amount for 5 years, 10 years, 30 years and 50 years were 247.3 t/(hm²·a), 163.6 t/(hm²·a), 118.3 t/(hm²·a) and 114.7 t/(hm²·a), respectively. According to the environmental capacity method, the heavy metal pollution risk of sludge products applied to soil in Beijing area was low and the land use potential was large, and the heavy metal risk in descending order was zinc, mercury, copper, cadmium, arsenic, chromium, nickel and lead. Mercury was the key element for safety risk prevention and control, and zinc was the element for ecological risk prevention and control. The dynamic safety calculation algorithm of “taking the standard limit as the bottom line and the environmental capacity as the baseline” was proposed to guide the application of sludge products in different land use directions.

Key words: sludge product; land use; benchmarking method; environmental capacity method; safe application amount

城镇生活污泥来源于生活污水,从根源上讲,其主要成分是人类摄取自然界营养物后的“剩余价值”,但受到现代人类日常生产生活的干预,使得污水成分复杂,进而导致污泥兼具营养资源与环境污染的双重属性^[1]。当前,采用经无害化、稳定化处理的污泥产品开展土地资源化利用是一种行之有效的处置方式^[2-3]。然而如何科学利用营养资源,降低环境污染风险,是其土地利用过程中不可规避的问题。从环境保护的角度看,污泥产品中的重金属是导致环境风险的主要因素。因此,如何科学评价污泥产品的用量、核算以环境保护为目标的安全施用阈值,对土地利用的可持续性至关重要。当前评判污泥产品土地利用的方法不多,业内常用的是对标法,主要以泥质、利用方向为基础,选择合适的利用标准,按固定用量和频次开展工作,但这种方法忽视了不同区域土壤理化性状背景下的环境承载力以及土壤在自然循环过程中的自我修复能力,在适用性上存在局限性。

当前我国污泥产品的土地利用尚处于发展阶段,标准多集中在住建部门2009年—2011年颁布的应用标准^[4],至今仍未建立污泥产品土地施用量的科学指导方法。先前标准对当前土地利用指导的适用性以及实际应用过程中土地归口单位对污泥产品的环境管理尚待进一步探讨,亟待颁布一些规范污泥产品土地安全施用量指导方法的行业标准、指南。

因此,为了更好地推动污泥产品土地利用科学

指导方法的建立,笔者通过对文献及标准的总结学习,以北京的土壤重金属背景值、2021年中心城区污泥产品质量均值为基础,从环境管理的角度,通过对标法、静态环境容量法、动态环境容量法分析了采用不同方法核算的污泥产品最大安全施用量、优缺点及土地利用防控要求,提出了最大安全施用量动态安全核算法,以期对未来国内行业的发展、实践提供思路。

1 基于环境容量的安全施用量方法

土壤重金属负载容量是指在一定区域和期限内,遵循相关土壤污染风险管控标准时,土壤所能容纳某种重金属的最大负荷量。土壤重金属负载容量分为静态容量和动态容量两类^[5-6]。

1.1 静态环境容量法

静态环境容量^[5,7]是指在一定区域和期限内,假定土壤中重金属在不参与环境循环的情况下,土壤所能容纳某种重金属的最大负荷量。可计算一次的最大投入量,也可以根据施用周期,计算年平均施用量,具体公式如下:

$$Q_i = \frac{M \times (S_i - C_i) \times 10^{-6}}{n} \quad (1)$$

式中: Q_i 为土壤重金属*i*的静态环境容量,kg/(hm²·a); M 为每公顷0~20 cm表层土质量,其值为 2.25×10^6 kg/hm²; S_i 为《土壤环境质量 农用地土壤污染的险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中重金属*i*的风险筛选值,mg/kg; C_i 为土壤中重金属*i*的含量,mg/kg; n 为控制年限,a。

$$P = \frac{Q_i}{W_i} \times 10^3 \quad (2)$$

式中: P 为污泥产品施用量, $t/(hm^2 \cdot a)$; W_i 为污泥产品中重金属 i 的平均含量, mg/kg 。

1.2 动态环境容量法

动态环境容量^[6]是指在一定区域和期限内,假定土壤中重金属在参与环境循环的情况下,土壤所能容纳某种重金属的最大负荷量。土壤动态容量的大小除了与环境质量标准规定的限量值和环境背景值有关外,还与土壤重金属的输入输出平衡有关,具体公式如下:

$$Q_{in} = \frac{2.25 \times (S_i - C_i \times K^n) \times (1 - K)}{K \times (1 - K^n)} \quad (3)$$

式中: Q_{in} 为土壤重金属 i 的动态环境容量, $kg/(hm^2 \cdot a)$; K 为土壤重金属 i 的残留率,与植物吸收、土壤中的损失等因素有关,一般取 0.9。

$$H = \frac{Q_{in}}{W_i} \times 10^3 \quad (4)$$

式中: H 为污泥产品施用量, $t/(hm^2 \cdot a)$ 。

2 结果与分析

2.1 基于对标法的安全施用量

2021年北京中心城区污泥产品重金属含量均值及常用土地利用标准见表1。污泥产品泥质在满足标准要求的条件下,参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中农用地土壤污染风险筛选值的相关限值要求,可

对应标准开展施用工作。从对标结果来看,8项重金属均满足《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 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)($pH \geq 6.5$)、《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》(GB/T 24600—2009)($pH \geq 6.5$)、《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)B级要求,且远低于限值,但汞不符合 GB 4284—2018 A 级中 $<3 \text{ mg/kg}$ 的限值要求。

污泥产品施用量和施用年限参照标准执行,其中《城镇污水处理厂污泥处置 林地用泥质》规定林地年施用污泥量累计不应超过 30 t/hm^2 ,连续施用不超过 15 年;《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》规定每年每万平方米土地施用干污泥量不大于 $30\,000 \text{ kg}$;《农用污泥污染物控制标准》规定 A 级可用于耕地、园地、牧草地, B 级可用于园地、牧草地、不种植食用农作物的耕地,并要求污泥产物农用时,年用量累积不应超过 7.5 t/hm^2 (以干基计),连续使用不应超过 5 年;《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》未明确规定用量和年限,但规定了施用量推算方式,表明在污泥园林绿化利用时,宜根据污泥施用地点的面积、土壤污染物本底值和植物的需氮量,确定合理的污泥施用量。由此可见,针对不同污泥土地利用方向的最大安全施用量不同,其中林地利用、土地改良最大,安全施用量均不应超过 $30 \text{ t/(hm}^2 \cdot a)$ 。

表1 基于对标法的污泥产品安全施用量

Tab.1 Safe application amount of sludge products based on benchmarking method

$mg \cdot kg^{-1}$

项 目	镉	汞	铅	铬	砷	镍	锌	铜
2021年北京中心城区污泥产品重金属含量均值(以干基计)	0.81	7.05	18.56	58.14	8.58	29.73	656.65	155.44
《城镇污水处理厂污泥处置 林地用泥质》(CJ/T 362—2011)	<20	<15	<1 000	<1 000	<75	<200	<3 000	<1 500
《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)($pH \geq 6.5$)	<20	<15	<1 000	<1 000	<75	<200	<4 000	<1 500
《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》(GB/T 24600—2009)($pH \geq 6.5$)	20	15	1 000	1 000	75	200	4 000	1 500
《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)	A 级	<3	<3	<300	<500	<30	<100	<1 200
	B 级	<15	<15	<1 000	<1 000	<75	<200	<3 000
《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018) ($pH > 7.5$, 其他类)	0.6	3.4	170	250	25	190	300	100

2.2 基于静态环境容量法的安全施用量

根据前人的研究结果^[8],北京市土壤重金属背景值如下: $Cd=0.119 \text{ mg/kg}$ 、 $Hg=0.218 \text{ mg/kg}$ 、 $As=7.09 \text{ mg/kg}$ 、 $Pb=24.6 \text{ mg/kg}$ 、 $Cr=29.8 \text{ mg/kg}$ 、 $Cu=$

18.7 mg/kg 、 $Zn=57.5 \text{ mg/kg}$ 、 $Ni=26.8 \text{ mg/kg}$,结合 2021年北京中心城区污泥产品重金属含量均值和《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中农用地土壤污染风险筛

选值($\text{pH}>7.5$,其他类),以此作为计算依据,规划一次施用投入量和以10、30、50 a三种周期场景推算得出的年最大安全施用量。结果如表2所示,以不同重金属核算得到的污泥产品安全施用限值的差异很大,从一次施肥投入场景来看,变动幅度在830.9~17 626.6 $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 之间;从重金属风险度排

名来看,依次为锌>汞>铜>镉>砷>铬>镍>铅。因此,重金属锌为土地利用最大风险元素,以锌为重金属安全施用量控制元素,从不同施肥规划周期来看,一次施用情况下的污泥产品最大安全施用量为830.9 $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$,10、30、50 a周期的最大安全施用量分别为83.1、27.7、16.6 $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 。

表2 基于静态环境容量法的污泥产品安全施用量

Tab.2 Safe application amount of sludge products based on static environmental capacity method

项目	筛选值 $S_i/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	土壤重金属含量 $C_i/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	年限 n/a	静态环境容量 $Q/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	污泥产品安全施用量 $P/(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ (干基)
镉	0.6	0.119	1	1.08	1 336.1
			10	0.11	133.6
			30	0.04	44.5
			50	0.02	26.7
汞	3.4	0.218	1	7.16	1 015.5
			10	0.72	101.6
			30	0.24	33.9
			50	0.14	20.3
砷	25	7.09	1	40.30	4 696.7
			10	4.03	469.7
			30	1.34	156.6
			50	0.81	93.9
铅	170	24.6	1	327.15	17 626.6
			10	32.72	1 762.7
			30	10.91	587.6
			50	6.54	352.5
铬	250	29.8	1	495.45	8 521.7
			10	49.55	852.2
			30	16.52	284.1
			50	9.91	170.4
铜	100	18.7	1	182.93	1 176.8
			10	18.29	117.7
			30	6.10	39.2
			50	3.66	23.5
锌	300	57.5	1	545.63	830.9
			10	54.56	83.1
			30	18.19	27.7
			50	10.91	16.6
镍	190	26.8	1	367.20	12 351.2
			10	36.72	1 235.1
			30	12.24	411.7
			50	7.34	247.0

2.3 基于动态环境容量法的安全施用量

从可持续发展的角度出发,以2.1节和2.2节中所述土壤重金属背景值、污泥产品重金属含量均值和土壤污染风险筛选值为依据,计算得到不同施

用年限(5、10、30、50 a)下的动态环境容量和污泥产品安全施用量,结果如表3所示。

从表3可以看出,安全施用量随着污泥产品施用年限的增长而逐渐降低,根据以不同重金属核算

得到的安全施用量,重金属风险度排名依次为锌>汞>铜>镉>砷>铬>镍>铅。以 8 项重金属计算得出的施用量最小值作为最大安全施用量,重金属锌同

样为土地利用最大风险元素,5、10、30、50 a 周期的最大安全施用量分别为 247.3、163.6、118.3 和 114.7 t/(hm²·a)。

表 3 基于动态环境容量法的污泥产品安全施用量

Tab.3 Safe application amount of sludge products based on dynamic environmental capacity method

项 目	筛选值 $S_i/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	土壤重金属含量 $C_i/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	年限 n/a	动态环境容量 $Q_{in}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	污泥产品安全施用量 $H/(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})(\text{干基})$
镉	0.6	0.119	5	0.32	399.3
			10	0.21	264.7
			30	0.16	191.8
			50	0.15	186.0
汞	3.4	0.218	5	2.00	283.3
			10	1.28	181.0
			30	0.89	125.6
			50	0.85	121.2
砷	25	7.09	5	12.71	1 480.9
			10	8.65	1 007.8
			30	6.45	751.5
			50	6.27	731.1
铅	170	24.6	5	94.91	5 113.9
			10	61.96	3 338.3
			30	44.11	2 376.6
			50	42.69	2 300.0
铬	250	29.8	5	141.88	2 440.3
			10	91.97	1 581.9
			30	64.94	1 116.9
			50	62.79	1 079.9
铜	100	18.7	5	54.31	349.4
			10	35.88	230.8
			30	25.90	166.6
			50	25.11	161.5
锌	300	57.5	5	162.42	247.3
			10	107.45	163.6
			30	77.68	118.3
			50	75.31	114.7
镍	190	26.8	5	106.33	3 576.6
			10	69.34	2 332.4
			30	49.31	1 658.5
			50	47.71	1 604.8

3 讨论

3.1 污泥产品最大安全施用量评估方法对比

从不同方法的优缺点来看,对标法是以现行标准内容为依托,以泥质控制限值、适用方向、施用量等规定内容,开展污泥产品土地利用的一种方法,相对而言比较客观、操作性强、合规性高,但在指导用量上存在局限性。土壤环境容量法是以土壤污

染风险筛选值为依据,以施用产品的环境风险防控为目标的计算方法。静态环境容量法不考虑污泥产品连续施用后重金属在土壤中的自然衰减,可用于核算污泥产品一次施用最大环境容量,也可根据控制年限核算年度用量,方法相对保守,在使用上同样具有局限性。动态环境容量法考虑污泥产品连续施用后重金属在土壤中的衰减,以施用周期规

划为基础,核算不同周期年度土地安全环境容量,适用性强,计算过程更为科学,体现了以环境防控为目标的可持续安全施用策略。

从不同方法给出的安全施用量来看,在北京地区土壤环境条件下,核算得到的安全施用量差异显著。从数值来看,以锌为最大风险元素核算最大安全施用量限值,对标法分析中当前的最大推荐用量 $[30 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 约为静态环境容量法30 a施用规划周期的水平,而动态环境容量法考虑了重金属的自然迁移,在50 a规划周期内的年施用量 $[114.7 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 仍显著高于其他两种方法。但如果将当前北京污泥产品施用于南方酸性土壤,按GB 15618—2018中($\text{pH} \leq 5.5$)土壤污染风险筛选值(其他类)的重金属限值要求,在与前文同样的规划周期下,经重新核算,以环境容量法测算的最大风险元素则变为重金属汞,其中静态环境容量法一次施用情况下的最大安全施用量为 $345.3 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,10、30、50 a周期的最大安全施用量分别为34.5、11.5、6.9 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;动态环境容量法5、10、30、50 a周期的最大安全施用量分别为101.4、66.6、47.8和46.3 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。若此情景以对标法最大推荐用量 $[30 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 的土地利用方式连续施用,在不考虑重金属降解的条件下,10~30 a施用周期则会出现土壤重金属环境污染问题。由此可知,同一品质污泥产品在不同土壤条件下开展土地利用的适用性不同,若同时考虑土壤本底值、污泥产品差异等多重因素,不同条件下得出的结果不是单一的,而是动态变化的。因此,以环境保护为宗旨的污泥产品最大安全施用策略应该因地制宜,择优选择最佳安全施用量,用以指导产品未来的科学施用。

基于此,为了最大限度保护环境,科学指导污泥产品的施用策略,本研究提出“以标准限值为底线,以环境容量为基线”的动态安全核算法,在具有对应土地利用方向标准的情况下,若规划污泥产品长期连续施用,应结合对标法、动态环境容量法的最低限值作为最大安全施用量;若考虑短期,则应结合对标法、静态环境容量法的最低限值作为最大安全施用量。若在无对应土地利用方向标准的情况下,如矿山修复等,宜按照用地功能规划的土地质量要求采用静态环境容量法确定一次最大安全施用量。

3.2 污泥产品土地利用重金属防控要求

尽管安全施用量计算方法的目的是用于推算污泥产品的最大安全用量,但通过方法参数和计算结果却反映出污泥产品土地利用背后错综复杂的专业关系。

污泥产品土地利用是基于环境、生态学等多学科的交叉领域,单从重金属环境污染问题来看,在北京土壤质量条件下以当前北京污泥产品重金属含量和土壤污染风险筛选值($\text{pH} > 7.5$)分析环境容量,北京污泥产品土地利用的土壤重金属污染风险很低,这与前人研究结果^[9]一致。从计算得出的最大安全施用量来看,在考虑重金属衰减和不考虑衰减两种状态下,污泥产品土地利用均表现出较大潜力,且具备可持续性。从风险防控角度来看,由于污泥产品中重金属锌本身含量高,锌元素在土地利用中风险最大,而实际从GB 15618—2018来看,标准对重金属锌只有风险筛选值,并没有管制值要求,并且锌属于作物必需的土壤微量元素,参与生长素的代谢等,对植物具有重要作用。但从风险排名第二的汞元素来看,其毒性强,且易转换为有效价态,对植物、人体健康风险大。因此,基于环境容量法计算结果及前人研究^[9]来看,宜将汞列为安全风险防控关键元素,锌为生态风险防控元素。

4 结论

① 基于对标法,当前北京污泥产品质量符合林地、园林绿化、土地改良、农用B级用途,对应的最大施用量不应超过 $30 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,具体用量按对应方向的标准执行。环境容量法主要考虑重金属的土壤承载力,静态环境容量法不考虑重金属衰减,一次最大安全施用量为 $830.9 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,10、30、50 a周期的最大安全施用量分别为83.1、27.7、16.6 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;动态环境容量法考虑重金属衰减,5、10、30、50 a周期的最大安全施用量分别为247.3、163.6、118.3和114.7 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

② 基于环境容量法,在北京土壤质量条件下以当前污泥产品重金属含量和土壤污染风险筛选值($\text{pH} > 7.5$)分析环境容量,土壤重金属污染风险很低,污泥产品土地利用潜力大,风险排名依次为锌>汞>铜>镉>砷>铬>镍>铅,宜将汞列为安全风险防控关键元素,锌为生态风险防控元素。

③ 提出“以标准限值为底线,以环境容量为

基线”的动态安全核算法,在具有对应土地利用方向标准的情况下,若规划污泥产品长期连续施用,应结合对标法、动态环境容量法最低限值作为最大安全施用量;若考虑短期,则应结合对标法、静态环境容量法最低限值作为最大安全施用量。在无对应土地利用方向标准的情况下,宜按用地功能规划的土地质量要求采用静态环境容量法确定一次最大安全施用量。

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, 4.
DAI Xiaohu. Applications and perspectives of sludge treatment and disposal in China [J]. Science, 2020, 72(6): 30-34, 4 (in Chinese).
- [2] 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).
- [3] 李雪怡, 梁远, 方小峰, 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).
- [4] 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).
- [5] 赵秀兰, 卢吉文, 陈萍丽, 等. 重庆市城市污泥中的重金属及其农用环境容量[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 188-192.
ZHAO Xiulan, LU Jiwen, CHEN Pingli, et al. Content, speciation of heavy metal in sewage sludge and its environmental capacity for agricultural use in Chongqing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(11): 188-192 (in Chinese).
- [6] 麦尔哈巴·图尔贡, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿依努尔·麦提努日, 等. 吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属环境容量评价与预测[J]. 地球与环境, 2020, 48(5): 584-592.
TURHUN Marhaba, EZIZ Mamattursun, MATNURI Aynur, et al. Evaluation and prediction of environmental capacities of heavy metals in vineyard soils in the Turpan basin [J]. Earth and Environment, 2020, 48(5): 584-592 (in Chinese).
- [7] 何萍, 徐新朋, 周卫, 等. 肥料养分推荐原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 285-287.
HE Ping, XU Xinpeng, ZHOU Wei, et al. The Principle and Application of Fertilizer Nutrient Recommendation [M]. Beijing: Science Press, 2021: 285-287 (in Chinese).
- [8] 霍霄妮, 李红, 张微微, 等. 北京耕作土壤重金属多尺度空间结构[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 223-229.
HUO Xiaoni, LI Hong, ZHANG Weiwei, et al. Multi-scale spatial structure of heavy metals in Beijing cultivated soils [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(3): 223-229 (in Chinese).
- [9] 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, 45.
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, 45 (in Chinese).

作者简介:崔超(1990-),男,山东淄博人,硕士,工程师,主要研究方向为城镇污泥处理处置与资源化利用。

E-mail:cuichao5212009@163.com

收稿日期:2022-01-25

修回日期:2022-07-12

(编辑:沈靖怡)