

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.08.007

基于氮磷供需平衡法的污泥产品土地利用探讨及思考

崔超, 熊建军, 张荣兵, 姚大伟, 白家云, 高始涛, 和亮
(北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

摘要: 对标分析了北京中心城区污泥产品土地利用的适用性,探讨了基于实测和经验值两种氮磷供需平衡法的适用性及最大安全施用量,以期为国内污泥土地利用相关规范性文件的修订或出台提供借鉴。研究结果显示:①污泥产品质量满足现行林地、园林绿化等国际及行业标准要求,标准推荐用量均在环境容量范围内,但现行标准只有最大推荐用量,均未提出推荐用量内最大安全施用量的核算方法。②实测氮磷供需平衡法较经验值法能更客观地从目标植物氮磷需求、土壤氮磷养分供给、污泥产品氮磷释放能力三方面科学核算污泥产品最大安全施用量,其结果准确性和合理性更高。③应结合现行污泥产品土地利用标准,根据目标场景中常见植物种类的氮磷需肥规律,总结以产量追求和以景观效应追求为目的两类目标导向下不同植物年氮磷需求量参数表,研究污泥产品氮磷释放速率及利用率,结合土壤肥力质量条件,依据氮磷供需平衡方法学,确定目标利用场景下标准推荐用量范围内的最大安全施用量。

关键词: 污泥产品; 土地利用; 氮磷供需平衡法; 最大安全施用量

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)08-0040-07

Discussion and Thinking on Land Use of Sludge Products Based on Nitrogen and Phosphorus Supply and Demand Balance Method

CUI Chao, XIONG Jian-jun, ZHANG Rong-bing, YAO Da-wei, BAI Jia-yun,
GAO Shi-tao, HE Liang

(Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: This paper analyzed the land utilization of sludge products in the central city of Beijing by standard comparison, discussed the applicability and maximum safe application amounts of two methods of nitrogen and phosphorus supply and demand balance based on measured and empirical values, in order to provide reference for the revision or promulgation of relevant normative documents on sludge land use in China. The results showed that: ① The quality of sludge products met the requirements of current international and industrial standards such as forest land and landscaping, and the recommended dosage of the standard was within the environmental capacity, but the current standard only indicated the maximum recommended dosage, and no accounting method for the maximum safe dosage within the recommended dosage was proposed. ② Compared with the empirical value method, the actual measurement method of supply and demand balance of nitrogen and phosphorus could scientifically calculate the maximum safe application amount of sludge products from three aspects: nitrogen and phosphorus demand of target plants, soil nitrogen and phosphorus nutrient supply, and nitrogen and

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

phosphorus release capacity of sludge products, the calculation results of the actual measurement method were more accurate and reasonable. ③ Based on the current application direction and content of sludge land use standards, future research should focus on the nitrogen and phosphorus requirements of common plant species suitable for target application scenarios. A parameter table of annual nitrogen and phosphorus requirements for plants should be summarized under the two goal orientations: yield pursuit and landscape effect pursuit. Additionally, the nitrogen and phosphorus release and utilization rates of sludge products should be studied to determine their annual availability. By combining this with the soil fertility quality of the application site and using the nitrogen and phosphorus supply-demand balance methodology, the maximum safe application amount within the standard-recommended dosage range can be determined for specific application scenarios.

Key words: sludge product; land use; supply and demand balance method of nitrogen and phosphorus; maximum safe application amounts

日常生活污水中粪和尿体积仅占1%~2%,却贡献了污水中约60%的有机物和95%以上的氮、90%的磷负荷^[1]。城镇污泥产品是人粪尿、生活杂水及其他在城镇污水处理过程中所产副产物的减量化、无害化、稳定化产物,兼具氮磷营养资源与环境污染的双重属性^[2-4]。长期以来,人畜粪尿肥一直是我国重要的有机肥资源,但随着城镇化的加速及化肥的发展,人粪尿与土地利用的循环链条逐渐中断^[5]。从当前研究^[6-8]来看,达标污泥产品开展土地利用是一种有效的处置方式,是重构污水厂碳氮磷资源与自然生态循环的有效途径。

污泥产品土地利用的环境风险问题不容忽视,其质量管控和科学施用是避免环境风险的有效途径^[9]。当前《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 农用泥质》(CJ/T 309—2009)、《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)分别规定了不同应用方向的污泥产品品质、最大推荐施用量及施用年限,《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)则要求根据污泥使用地点的面积、土壤污染物本底值和植物的需氮量来确定合理的污泥使用量。基于此,污泥产品土地安全用量不仅与土地利用方向有关,还与不同应用方向的土壤污染物本底值和各类型植物的养分需求量有关。如何在现行标准最大推荐用量范围内核算最大安全施用量,当前应用标准中均缺乏具体计算方法。在污泥产品土地利用的环境管理方面,基于污泥品质和土壤污染物本底值的环境容量核算方法已有相

关研究,但基于植物氮磷养分需求量确定最大安全施用量的指导方法鲜有报道。

当前污泥产品土地利用管理者更多关注以消纳为目的的环境安全阈值分析,对土地利用过程中氮磷养分平衡关注度较低。而污泥产品土地利用的最终目的是建立污泥中氮、磷、有机质等营养资源的生态循环链。在利用过程中氮磷养分管理应与环境管理并行开展,以保障土地利用方向的广泛性和发展可持续性。因此,通过对标分析污泥产品土地利用适用方向及作物,讨论氮磷供需平衡法的适用性及最大安全施用量,以期国内土地应用标准的修订或污泥产品土地利用最大安全施用量技术指南的出台提供思路。

1 研究方法

1.1 土壤重金属动态环境容量法

动态环境容量是指在一定区域和期限内,假定土壤中重金属参与环境循环的情况下土壤容纳某种重金属的最大负荷量。土壤的动态容量除了与环境质量标准规定的限量值和环境背景值有关外,还与土壤重金属输入输出平衡有关。参考相关文献,北京市土壤重金属背景值如下: Cd 为 0.119 mg/kg, Hg 为 0.218 mg/kg, As 为 7.09 mg/kg, Pb 为 24.6 mg/kg, Cr 为 29.8 mg/kg, Cu 为 18.7 mg/kg, Zn 为 57.5 mg/kg, Ni 为 26.8 mg/kg。污泥产品年施用量计算公式如下:

$$H_i = 1\,000 \frac{Q_i}{W_i} \quad (1)$$

$$Q_i = \frac{2.25 \times (S_i - C_i \times K_i^n) \times (1 - K_i)}{K_i \times (1 - K_i^n)} \quad (2)$$

式中: H_i 为含重金属 i 的污泥产品年施用量, $t/(hm^2 \cdot a)$; Q_i 为土壤重金属 i 的年平均动态容量, $kg/(hm^2 \cdot a)$; W_i 为污泥产品中重金属 i 的平均含量, mg/kg ; S_i 为《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中重金属 i 的风险筛选值, mg/kg ; C_i 为土壤重金属 i 的含量, mg/kg ; K_i 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; n 为控制年限, 一般取 10 年、30 年、50 年计算。

1.2 基于氮磷供需平衡法的安全施用量计算方法

1.2.1 实测法

参照《畜禽粪便还田技术规范》(GB/T 25246—2010)、《畜禽粪便安全还田施用量计算方法》(NY/T 3958—2021), 在有田间试验和土肥分析化验的条件下, 区域内单位面积目标植物预期产量的污泥产品最大施用量的计算方法如下:

$$N = \frac{A - S}{dr} f \quad (3)$$

$$A = y \times a \times 10^{-2} \quad (4)$$

$$S = 2.25 \times 10^{-3} \times c \times t \quad (5)$$

式中: N 为一定土壤肥力和单位面积植物目标产量下当季需要投入的污泥产品量, t/hm^2 ; A 为预期单位面积产量下植物所需氮磷元素数量, t/hm^2 ; S 为预期单位面积产量下作物从土壤中吸收的氮磷元素数量, t/hm^2 ; d 为污泥产品中氮磷元素含量, %; r 为污泥产品当季利用率, 参照畜禽粪便, 一般在 25%~30% 范围内或通过田间试验确定; f 为当地生产活动中, 污泥产品施用量占总施用量的比例, %; y 为预期单位面积产量, t/hm^2 ; a 为植物形成 100 kg 产量吸收的营养元素量, kg ; 2.25×10^{-3} 为土壤养分的换算系数; c 为土壤中有效氮磷量, mg/kg ; t 为土壤养分校正系数, 即植物吸收某种养分占土壤中该有效养分总量的百分数, 推荐氮为 32%、磷为 80%。

以北京地区为例。北京中心城区 2021 年城镇高级厌氧消化污泥产品总氮、总磷含量分别为 3.07%、7.02%, 北京土壤^[10]碱解氮为 73.4 mg/kg 、有效磷为 31.1 mg/kg , 土壤氮、磷有效养分校正系数分别参照 32%、80%, 污泥产品养分利用率参照畜禽粪便为 25%, 施用量假定污泥产品 100% 替代其他施肥。根据污泥产品土地利用对标结果, 参照 2018 年发布的《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》, 选取棉花、葡萄、苹果、梨、苜蓿、饲用燕麦、杨树作为

研究目标植物, 其氮磷需求量及目标产量如表 1 所示。

表 1 研究植物氮磷需求量及目标产量

Tab.1 Nitrogen and phosphorus demand and target yield of studied plants

作物种类		氮磷需求量推荐值		目标产量
		氮	磷	
大田作物	棉花	11.7 kg/100 kg	3.04 kg/100 kg	2.2 t/hm ²
果树	葡萄	0.74 kg/100 kg	0.512 kg/100 kg	25 t/hm ²
	苹果	0.3 kg/100 kg	0.08 kg/100 kg	30 t/hm ²
	梨	0.47 kg/100 kg	0.23 kg/100 kg	22.5 t/hm ²
人工草地	苜蓿	0.2 kg/100 kg	0.2 kg/100 kg	20 t/hm ²
	饲用燕麦	2.5 kg/100 kg	0.8 kg/100 kg	4 t/hm ²
人工林地	杨树	2.5 kg/m ³	2.5 kg/m ³	20 m ³ /hm ²

1.2.2 经验值法

在不具备田间试验和土肥分析化验条件下, 基于植物氮磷养分需求, 确定区域内单位面积目标植物预期产量的污泥产品最大年施用量计算方法, 具体如下:

$$N = \frac{Ap}{dr} f \quad (6)$$

式中: p 为由施肥创造的产量占总产量的比例, %。

以北京地区为例。北京中心城区 2021 年城镇高级厌氧消化污泥产品总氮、总磷均值分别为 3.07% 和 7.02%, 北京土壤^[10]全氮为 0.88 g/kg 、有效磷为 31.1 mg/kg , 参照 2018 年发布的《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》、《畜禽粪便安全还田施用量计算方法》(NY/T 3958—2021), 确定氮、磷供给占比按土壤 II 级分别为 45%、45%, 污泥产品养分当季利用率参照畜禽粪便参考值 25%, 施用量假定污泥产品 100% 替代其他施肥。目标植物选择与实测法相同。

2 结果与分析

2.1 基于对标法的污泥产品土地利用适用性分析

北京中心城区 2021 年的污泥产品重金属含量均值与现行土地利用标准对比见表 2。从对比结果来看, 8 项重金属指标均满足 CJ/T 362—2011、GB/T 23486—2009($pH \geq 6.5$)、CJ/T 309—2009(B 级)、GB 4284—2018(B 级)要求, 且均远低于各标准重金属限值, 施用地根据 GB 15618—2018 风险筛选值的相关限值要求, 按对应标准开展土地利用工作。

从污泥产品施用量、施用年限和施用对象来

看,各标准要求不一,以农用最为严格。具体来看,CJ/T 362—2011 规定林地年用量累计不应超过 30.0 t/hm²,连续施用不应超过 15 年;CJ/T 309—2009 规定 B 级污泥适用于油料作物、果树、饲料作物、纤维作物,禁止施用蔬菜和粮食作物,年用量不应超过 7.5 t/hm²,连续施用不超过 10 年;GB 4284—2018 规定 B 级污泥可用于园地、牧草地、不种植食用农作物的耕地,年用量累积不应超过 7.5 t/hm²,连续施用不应超过 5 年;GB/T 23486—2009 未明确规

定用量和年限,但提出“宜根据污泥使用地点的面积、土壤污染物本底值和植物的需氮量,确定合理的污泥使用量”的要求。从重金属环境容量分析(见表 3)来看,当前污泥产品中重金属风险度排名依次为锌>汞>铜>镉>砷>铬>镍>铅。以重金属锌为最大风险元素,10 年、30 年、50 年规划施用周期的最大安全施用量分别为 163.6、118.3、114.7 t/(hm²·a),现行国家及行业标准污泥推荐用量均在环境容量范围内。

表 2 基于对标法的污泥产品土地利用分析

Tab.2 Land use analysis of sludge products based on benchmarking method

mg·kg⁻¹

类别		镉	汞	铅	铬	砷	镍	锌	铜
北京厌氧消化污泥产品(均值,以干基计)		0.81	7.05	18.56	58.14	8.58	29.73	656.65	155.44
CJ/T 362—2011		<20	<15	<1 000	<1 000	<75	<200	<3 000	<1 500
GB/T 23486—2009(pH≥6.5)		<20	<15	<1 000	<1 000	<75	<200	<4 000	<1 500
CJ/T 309—2009	A 级	<3	<3	<300	<500	<30	<100	<1 500	<500
	B 级	<15	<15	<1 000	<1 000	<75	<200	<3 000	<1 500
GB 4284—2018	A 级	<3	<3	<300	<500	<30	<100	<1 200	<500
	B 级	<15	<15	<1 000	<1 000	<75	<200	<3 000	<1 500
GB 15618—2018(pH>7.5)其他		0.6	3.4	170	250	25	190	300	100

表 3 基于土壤动态容量法的污泥产品最大安全施用量

Tab.3 Maximum safe application amounts of sludge products based on soil dynamic capacity method

重金属	使用年限/a	污泥产品安全施用量(干基)/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	重金属	使用年限/a	污泥产品安全施用量(干基)/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
镉	10	264.7	铬	10	1 581.9
	30	191.8		30	1 116.9
	50	186.0		50	1 079.9
汞	10	181.0	铜	10	230.8
	30	125.6		30	166.6
	50	121.2		50	161.5
砷	10	1 007.8	锌	10	163.6
	30	751.5		30	118.3
	50	731.1		50	114.7
铅	10	3 338.3	镍	10	2 332.4
	30	2 376.6		30	1 658.5
	50	2 300.0		50	1 604.8

基于上述分析,在对标结果及重金属环境容量范围内,选取适宜本地区研究的植物种类,并分析基于氮磷供需平衡方法的适用性。

2.2 基于实测法的污泥产品最大安全施用量

基于氮磷供需平衡实测法的污泥产品最大安全施用量计算结果如表 4 所示。可以看出,不同植

物以氮计和以磷计的年污泥产品施用量计算结果差异较大,分别为-1.67~58.26 和-1.82~25.30 t/(hm²·a),且同一植物以氮计的污泥产品施用量均大于以磷计。上述现象主要取决于植物自身养分需求规律,从植物营养学角度,氮、磷都是植物生长的大量元素和必需元素,但其生长过程的吸氮量通常高于或等于吸磷量。

表 4 基于氮磷供需平衡实测法的污泥产品最大安全施用量

Tab.4 Maximum safe application amounts of sludge products based on the actual measurement method of the supply and demand balance of nitrogen and phosphorus

t·hm⁻²·a⁻¹

作物种类		以氮计污泥产品施用量(干基)	以磷计污泥产品施用量(干基)
大田作物	棉花	26.65	0.62
果树	葡萄	17.22	4.10
	苹果	4.84	-1.82
	梨	6.89	-0.24
人工草地	苜蓿	-1.67	-0.91
	饲用燕麦	10.70	-0.63
人工林地	杨树	58.26	25.30

从人工草地中的苜蓿来看,以氮计和以磷计的

污泥产品最大施用量均为负值,表明当前土壤肥力条件下可满足植物目标产量需求的氮磷吸收量,无需外源氮磷投入。从苹果、梨、饲用燕麦来看,植物吸磷量远低于氮需求量,因此核算结果显示,以氮计的污泥产品最大施用量均为正值,以磷计为负值,表明当前土壤肥力条件下土壤中的磷素可满足植物目标产量需求,而氮素则需依靠外源补充。若以氮磷核算最低值作为某种植物的最大安全施用量,即以磷为限值元素,污泥产品100%替代施肥会导致苹果、梨、饲用燕麦的氮素供应不足,进而影响植物正常生长。总体来看,以现况污泥产品施用于棉花、葡萄、苹果、梨、苜蓿、饲用燕麦的最大安全施用量较小,在 $-1.82 \sim 4.10 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 之间。

人工林地中杨树的氮磷吸收比例相对均衡,整体生物量大,因此其氮、磷养分需求较高,以氮、磷计的最大安全施用量均为正值,且显著高于其他植物种类。以磷为限值元素,杨树以氮磷养管理为目标的**最大安全施用量为 $25.30 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,且满足CJ/T 362—2011推荐用量不应超过 $30.0 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的要求。

2.3 经验值法的污泥产品最大安全施用量

经验值法的污泥产品最大安全施用量见表5。可以看出,不同植物以氮计和以磷计的污泥产品最大施用量变化趋势与实测法结果相近,但是施用量差异幅度较大,分别为 $2.35 \sim 29.32$ 和 $0.62 \sim 12.82 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,同一植物以氮计的污泥产品施用量也均大于以磷计。与实测法核算结果不同,以氮、磷分别核算的最大安全施用量均未出现负值,分析原因为经验值法采取的是养分吸收占比系数,而实测法是用植物氮磷需求量减去土壤供应量,而不同肥力土壤等级的氮磷供应大小不同,在高肥力、低需求量下,氮磷额外需求量为负值,表明土壤本身供肥充足。

根据经验值法的计算结果,在北京土壤肥力条件下,若以100%污泥产品替代施肥,以磷素作为施用限值,棉花、葡萄、苹果、梨、苜蓿、饲用燕麦的污泥产品施用量较小,在 $0.62 \sim 3.28 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 之间。基于以上应用植物场景,若考虑污泥产品推广应用,可按植物氮磷需求量参照有机肥20%~50%替代^[11]方式开展配施,以充分发挥污泥产品中有机质及其他微量元素的作用,氮磷缺少量通过尿素等单质化肥形式补充。而人工林地中杨树的氮磷吸收

量同样显著高于其他植物种类,具有污泥产品土地利用的显著优势,以磷为限值元素,杨树最大施用量为 $12.82 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

表5 基于氮磷供需平衡经验值法的污泥产品最大安全施用量

Tab.5 Maximum safe application amounts of sludge products based on the empirical value method of the supply and demand balance of nitrogen and phosphorus $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$

作物种类		以氮计污泥产品施用量(干基)	以磷计污泥产品施用量(干基)
大田作物	棉花	15.09	1.71
果树	葡萄	10.85	3.28
	苹果	5.28	0.62
	梨	6.20	1.33
人工草地	苜蓿	2.35	1.03
	饲用燕麦	5.86	0.82
人工林地	杨树	29.32	12.82

3 讨论与思考

3.1 不同氮磷平衡计算方法的适用性

基于氮磷供需平衡的实测和经验值最大安全施用量计算方法,是集植物、土壤、污泥产品三者为一体,通过污泥产品氮磷释放量、目标植物氮磷吸收量、土壤自身氮磷供给量,在考虑植物氮磷养分竞争及氮磷流失风险基础上,以目标植物氮磷核算用量低值确定最大安全施用量的计算方法。实测法需要对施用地土壤、污泥产品氮磷利用率等进行试验评估,专业性要求更高,经验值法则通过历史数据、经验数据的查询核算,过程相对容易,总体上两种方法都是基于不同应用场景、土壤质量,从污泥产品氮磷养管理角度给出的科学指导方法。

但从计算过程的合理性和结果的准确性来看,经验值法需要通过历史土壤数据确定由施肥创造的产量占总产量比例的经验值系数(p),而从当前有限的参考资料看,土壤氮磷养分只有三个等级划分,且 p 值变幅为35%~55%,由此看出,等级划分的详细程度将直接决定经验值的大小,进而影响施用量的核算,而实测法是通过客观计算目标植物的氮磷需求量和实测土壤氮磷供给量的差值,结合污泥产品自身氮磷释放能力,核算出的污泥产品施用量,其数据全部基于实测结果,准确性、合理性更高。

3.2 基于氮磷平衡法的适用性

根据污泥产品质量对标适用场景,通过参考资

料选取棉花、葡萄、苹果、梨、苜蓿、饲用燕麦、杨树7种植物,从植物推荐产量下自身需肥规律看,棉花、葡萄、苹果、梨、饲用燕麦的氮磷需求比例差异较大,且均显示需氮量大于需磷量,而苜蓿、杨树的氮磷需求量则处在同一水平。从推荐产量水平看,不同植物差异也很大,因而导致以不同植物每100 kg产量所需氮磷量核算目标产量的总氮磷需求量差异更大。从污泥产品自身氮磷养分含量看,养分比例磷高氮低,与植物常规需肥规律相反。因此,若以氮磷核算低值作为污泥产品最大安全施用量限值,从植物适用性角度,应选择需磷量高且目标产量高的植物作为污泥产品的适配应用场景,以最大化发挥污泥产品的土地利用优势。

从实测法和经验值法的核算结果看,尽管不同方法核算的用量不同,但均显示人工林地中杨树施用量最高,具有氮磷养分管理和污泥利用的双重作用。而对于其他植物,由于自身对污泥产品中磷素总量的需求较低且产量水平有限,因此污泥产品全量替代氮磷的适配性较低。对于上述低磷量需求植物,可根据植物种类及氮磷需求量参考有机肥20%~50%替代^[11]的推荐方式进行配施,充分发挥污泥产品中有有机质及其他微量元素的作用,其次通过尿素等单质化肥或复合肥补充氮磷需求量,以满足植物正常生长需要。

3.3 基于氮磷供需平衡法的适用性

我国污泥产品土地利用尚处于发展阶段,标准多颁布于2009年—2011年^[12],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氮磷养分的认识有待进一步研究。现有林地、园林绿化、农用等不同土地利用标准均以地上植物的种类确定泥质、施用量、年限及其他管理要求,而污泥产品土地安全用量不仅与土地利用植物方向有关,还与不同应用方向的土壤污染物本底值和各类型植物的氮磷养分需求量有关,但在现行标准最大推荐用量范围内,缺乏最大安全施用量的核算方法,导致污泥产品利用过程通常以标准最大推荐用量作为指导用量,继而可能导致氮磷养分过量投入而产生植物氮磷竞争胁迫以及氮磷流失所致面源污染^[13]的环境风险,在指导科学施用方面存在局限性。

污泥产品土地利用涉足环境学、土壤学、植物营养学的跨学科发展,氮磷营养与环境保护的平衡

是土地利用过程的关键,施用量应以泥质标准为基础,以氮磷养分高效科学利用为目标,充分发挥污泥产品资源功效。从业者应以现行污泥产品土地利用标准内容及应用方向为基础,研究、总结适宜现行应用标准场景的常用植物种类的氮磷需肥要求,对以产量追求和以景观效应追求为目标的两类植物分类管理,总结不同目标导向下不同植物年氮磷需求量参数表,同时研究污泥产品的氮磷释放规律,确定污泥氮磷利用率,以土壤肥力质量为基础,借鉴氮磷供需平衡管理理念,确定不同植物应用场景下对应标准推荐用量范围内的最大安全施用量,为污泥土地利用标准中安全用量核算方法修编,或污泥产品土地利用最大安全施用量技术指南的出台提供思路。

4 结论

① 北京中心城区污泥产品质量满足现行林地、园林绿化等国际及行业标准要求,标准推荐用量均在环境容量范围内,但现行标准只有最大推荐用量,均未提出标准推荐用量范围内最大安全施用量的核算方法。

② 氮磷供需平衡实测法较经验值法更能客观地从目标植物氮磷需求、土壤氮磷养分供给、污泥产品氮磷释放能力三方面科学核算污泥产品最大安全施用量,结果的合理性和准确性更高。结合应用标准并以磷为限值元素,实测法中人工林地杨树核算用量最高,为25.3 t/(hm²·a),具有氮磷养分管理和产品消纳的双重作用。而棉花、葡萄、苹果、梨、苜蓿、饲用燕麦生长需磷量较低,且氮磷吸收比例与污泥产品磷高氮低特性相反,核算施用量较低,在-1.82~4.1 t/(hm²·a)之间。

③ 应以现行污泥产品土地利用标准应用方向及内容为基础,研究适宜目标场景常见植物种类的氮磷需肥规律,总结产量和景观效应两类目标导向下植物年氮磷需求量参数表,研究污泥产品氮磷释放速率及利用率,结合土壤肥力质量条件,依据氮磷供需平衡方法学,确定目标应用场景下标准推荐用量范围内的最大安全施用量。

参考文献:

- [1] 郝晓地,周健,张健. 源分离生态效应及其资源化技术[J]. 中国给水排水,2016, 32(24):20-27.
HAO Xiaodi, ZHOU Jian, ZHANG Jian. Ecological

- effects of source separation and associated technologies towards resource[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(24):20-27(in Chinese).
- [2] 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. Applications and perspectives of sludge treatment and disposal in China [J]. *Science*, 2020, 72(6):30-34 (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):117-122.
- 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):117-122 (in Chinese).
- [4] 耿源濛, 张传兵, 张勇, 等. 我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, 42(10):4834-4843.
- GENG Yuanmeng, ZHANG Chuanbing, ZHANG Yong, *et al.* Speciation and ecological risk assessment of heavy metal(loid)s in the municipal sewage sludge of China [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(10):4834-4843 (in Chinese).
- [5] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- LIU Xiaoyong. Study on Nutrients Balance and Requirement in Agricultural Production in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agriculture Sciences, 2018 (in Chinese).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 魏琳琳, 马富亮, 李伟, 等. 基于热水解的厌氧消化污泥对沙土养分调节及细菌群落的影响[J]. *环境生态学*, 2020, 2(4):85-93.
- WEI Linlin, MA Fuliang, LI Wei, *et al.* Effects of anaerobic digestion sludge based on thermal hydrolysis on nutrients and bacterial communities in sandy soil [J]. *Environmental Ecology*, 2020, 2(4):85-93(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.
- 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).
- [10] 刘宝存, 赵永志, 赵同科, 等. 北京土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016:259-265.
- LIU Baocun, ZHAO Yongzhi, ZHAO Tongke, *et al.* *Beijing Soil* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2016:259-265 (in Chinese).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 王一格, 王海燕, 郑永林, 等. 农业面源污染研究方法与控制技术研究进展[J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(1):25-33.
- WANG Yige, WANG Haiyan, ZHENG Yonglin, *et al.* Advances in research methods and control technologies of agricultural non-point source pollution: a review [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(1):25-33 (in Chinese).

作者简介:崔超(1990-),男,山东淄博人,硕士,高级工程师,主要从事城镇污泥处理处置与资源化利用研究工作。

E-mail: cuichao5212009@163.com

收稿日期:2024-03-30

修回日期:2024-04-11

(编辑:丁彩娟)