



乔雪园,王先恺,陈祥,等. 市政污泥用于矿山废弃地生态修复的研究进展[J]. 矿业安全与环保,2024,51(6):154-160.
QIAO Xueyuan, WANG Xiankai, CHEN Xiang, et al. Research advances of municipal sludge used in mine ecological restoration of mine abandoned land[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(6): 154-160.
DOI: 10. 19835/j. issn. 1008-4495. 20230637

扫码阅读下载

环境保护

市政污泥用于矿山废弃地生态修复的研究进展

乔雪园¹,王先恺¹,陈祥¹,董滨^{1,2},李翀¹

(1. 中国长江三峡集团有限公司 长江生态环境工程研究中心,北京 100038; 2. 同济大学 环境科学与工程学院,上海 200092)

摘要: 矿山生态修复是“山水林田湖草”一体化治理的重要组成部分,同时市政污泥的处理处置问题也是城市环境问题的重点攻关方向。鉴于矿山生态修复基质用土的缺乏和市政污泥稳定化产物消纳路径的不畅,越来越多的研究开始关注将市政污泥应用于矿山生态修复的可能性。梳理了市政污泥稳定化产物的应用前景,分析将其用于矿山修复的生态效益,包括改良土壤理化性质、阻断矿山淋溶污染、强化植物对重金属土壤的修复效果等;指出市政污泥稳定化产物应用于矿山生态修复可能产生的次生污染风险,其生态毒性的累积会显著降低矿山植物的存活率,氮、磷等物质淋溶可能会污染地下水,需要严格控制市政污泥稳定化产物的用法用量。研究表明,进一步厘清市政污泥施用后对矿山土壤理化性质的长期影响,深化市政污泥稳定化产物固定重金属的机理研究,明确市政污泥稳定化产物最佳施用量和施用方式,建立市政污泥施用后的污染评估方法等,是未来的重要研究方向。

关键词: 矿山生态修复;市政污泥;固废资源化;污染防治;效益与风险

中图分类号:TD88;X705

文献标志码:A

文章编号:1008-4495(2024)06-0154-07

Research advances of municipal sludge used in mine ecological restoration of mine abandoned land

QIAO Xueyuan¹, WANG Xiankai¹, CHEN Xiang¹, DONG Bin^{1,2}, LI Chong¹

(1. Yangtze Eco-Environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Mine ecological restoration is an significant part of the integrated management of “mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands”, and the treatment and disposal of municipal sludge is also a key research direction in urban environmental issues. Given the lack of soil for mine ecological restoration substrate and the limited disposal options for stabilization products of municipal sludge, more and more researches have begun to focus on the possibility of applying municipal sludge to mine ecological restoration. This study reviews the application prospects of stabilization products of municipal sludge in mine restoration and analyzes the ecological benefits, including improving soil physical and chemical properties, preventing leaching pollution in mines, and enhancing the remediation effect of plants on soil containing heavy metals. It is suggested that the application of stabilization products of municipal sludge in mine ecological restoration also has certain secondary pollution risks. The accumulation of ecological toxicity may significantly reduce the survival rate of mine plants, and leaching of substances

such as nitrogen and phosphorus may pose a risk of groundwater pollution. Therefore, it is necessary to control the usage and dosage of stabilization products of municipal sludge. The research shows that further clarifying the long-term impact of municipal sludge application on the physical and chemical properties of mine soil, deepening the mechanism of fixation of heavy metals by municipal sludge stabilization products, clarifying the optimal application amount and application method of municipal sludge stabilization products, and establishing the pollution assessment method after municipal sludge application are

收稿日期:2023-07-27;2023-09-19 修订

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200700);
中国长江三峡集团有限公司科研项目(NBWL202300013)

作者简介:乔雪园(1993—),男,河南信阳人,博士,工程师,主要从事矿山生态修复和固废资源化利用研究工作。
E-mail:qiao_xueyuan@ctg.com.cn。

通信作者:陈祥(1984—),男,云南宣威人,硕士,教授级高工,主要从事有机固废资源化和土壤修复技术研究工作。
E-mail:cqem@foxmail.com。

important research directions in the future.

Keywords: mine ecological restoration; municipal sludge; resourceization of solid waste; pollution prevention and control; benefit and risk

矿产资源的大规模开发在为社会经济发展作出巨大贡献的同时,也导致了诸如地质灾害、土壤污染、粉尘污染、水生态破坏等环境问题。矿山废弃地的土壤往往存在肥力低、结构不良、保水性差、重金属超标、植被难以存活等特点,而矿山生态修复的最大难点在于被破坏土壤的重构及矿山重金属的淋溶污染防治^[1]。因此,亟需研发一种能够提供蓄水保水能力和充足营养物质的修复基质,以促进矿山土壤质量的恢复与提升。随着固废资源化及“以废治废”理念的兴起,业界在开发传统的矿山生态修复技术之外,也越来越多地关注有机固体废物(尤其是市政污泥稳定化产物)在矿山生态修复中的应用前景^[2-4]。市政污泥富含有机质和 N、P、K 等营养物质,将市政污泥稳定化产物用于矿山废弃地土壤修复,一方面可以为市政污泥产物提供稳定可靠的资源化利用途径,最大限度实现物质循环利用;另一方面可以加快污染土壤的理化性质改善、提高微生物活性,并加速植被生长^[5-6]。因此,将市政污泥稳定化产物应用于矿山生态修复将是一种“双赢”选择。但市政污泥属有机废物,其在矿山修复工程中的推广应用面临诸多问题和挑战,如对市政污泥施用效果了解不深、对施用风险和施用量把握不足等问题。这在很大程度上限制了其在矿山修复领域的推广应用。为此,笔者归纳市政污泥稳定产物的应用前景,重点分析将市政污泥稳定产物应用于矿山修复的生态效益和环境风险,并提出相关研究展望,以期对市政污泥处理处置与矿山生态修复协同治理提供理论参考和依据。

1 市政污泥稳定产物的应用前景

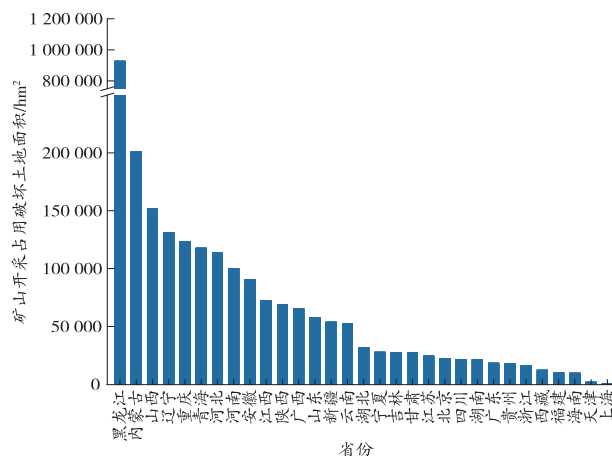
1.1 市政污泥处置需求

2020 年,我国县级及以上城市生活污水污泥产生量已达到 6 664 万 t(含水率 80%)。市政污泥富含有机质和 N、P、K 等营养物质,具有很强的资源属性,但因其含有致病菌、重金属和有机污染物等有害物质而同时具有很强的污染性,若未得到妥善处理处置,将会严重影响生态环境^[7-8]。目前,市政污泥处理处置方式主要包括焚烧、填埋、热解碳化、建材化利用、厌氧消化或好氧发酵后土地利用等^[7]。市政污泥稳定化后用于土地修复,可增加土壤肥力、改良土壤结构、促进植物生长,是资源利用率最高的处置方式。现阶段我国市政污泥的土地利用率不足 15%,远低于欧盟国家的 60%^[8]。据统计,我国市政污泥稳定化产物的有机质质量浓度为 21%~48%,总氮、总磷和总钾质量浓度分别

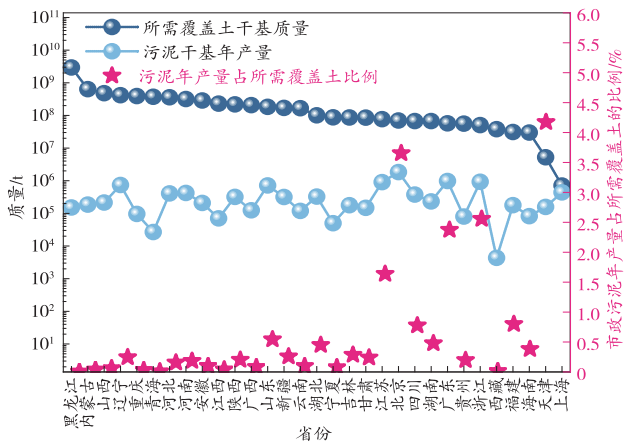
为 4.0~19.2、5.0~41.0、2.3~54.0 g/kg^[9],在土地利用方向具有良好的前景,但由于农用的诸多限制,园林绿化和城市废弃地的土壤改良将是污泥稳定化产物的重要消纳方式。

1.2 矿山生态修复需求

目前我国采矿用地面积为 $227 \times 10^4 \text{ hm}^2$,矿山开采损毁土地总面积达 $280 \times 10^4 \text{ hm}^2$,未复垦土地面积约 $231 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。其中,长江干流及其主要支流两岸 50 km 范围内,露天矿山侵占土地面积约为 $63\,526 \text{ hm}^2$ ^[10]。这些矿山的生态修复需要大量的基质用土。以 50 cm 土壤厚度保守估计,仅长江经济带露天矿山的基质土需求量便高达约 3 亿 m^3 ,极大地挤占了城市的生态用土空间。另一方面,由于采选冶炼、“三废”排放及尾矿渣淋溶的影响,某些金属矿区周边的土壤和水体中的重金属含量已严重超标,部分酸性矿山更是会引发水体酸化。有学者对长江流域 33 个矿区的受重金属污染土壤进行分析发现,这些重金属污染物主要来源于矿区生产活动中“三废”的排放^[11]。目前,国内外对于开采后矿山的重金属和淋溶污染防治技术的研究主要集中在物理修复、化学修复和生物修复 3 个方面^[12],主要包含 2 个层面:一是改良土壤理化性质,使其能够复林复垦;二是解决土壤重金属污染和酸性淋溶污染等问题,阻断次生污染风险,实现废弃地生态系统的全面修复。现有研究表明,市政污泥发酵产物不仅能够替代普通土壤作为基质土使用,还可以改良矿山土壤性质、阻断淋溶污染、促进植物生长和改良土壤微环境,是矿山生态修复的绝佳材料。利用市政污泥作为矿山生态修复的基质在时间维度上具有可持续性,消纳前景广阔^[3-4]。据统计,我国各省份污泥年产量远低于裸露矿山所需基质土质量,两者的比值为 0.007%~4.200%,如图 1 所示。



(a) 矿山开采占用土地面积



(b) 市政污泥年产量占矿山修复所需基质比例^[4]

图 1 不同省份矿山开采及市政污泥使用情况
Fig. 1 Mining and municipal sludge utilization in different provinces

表 1 市政污泥改良矿山土壤理化性质案例
Table 1 Cases of improving mining soil properties using municipal sludge

矿山类型	施用比例或施用量	实验期限/月	pH 值		有机质质量分数/%		密度/(g·cm ⁻³)		有效氮浓度/(mg·kg ⁻¹)		有效磷浓度/(mg·kg ⁻¹)		速效钾浓度/(mg·kg ⁻¹)		参考文献序号
			施用前	施用后	施用前	施用后	施用前	施用后	施用前	施用后	施用前	施用后	施用前	施用后	
铜矿	1%~8%	8.0			1.980	2.620~4.480	1.60	1.13~1.41	36.2	69.1~145.0	17.30	36.30~120.00	56.1	17.8~39.2	[5]
金属矿	17%~38%	1.0	6.8	6.6	1.020	4.630~8.490			33.0	258.0~450.0	69.60	123.00~170.00	79.4	99.4~146.0	[6]
稀土	40%	4.0	4.3	4.5	0.793	9.530	1.23	0.89	17.4	757.0	2.85	675.00	105.0	866.0	[14]
铁矿	75 t/hm ²	27.0	8.6	7.9	0.305	2.450			3.9	122.0	2.50	87.00	50.7	132.6	[2]
磷矿	5.5%~22.0%	36.0	6.0	7.3	2.930	4.070	1.30	0.98	7.0	14.8	30.00	33.50	16.0	16.0	[13]

由表 1 可见,施用量变化幅度极大,说明市政污泥的施用量需要根据矿山类型、矿山土壤实际情况和施用期限等因素进行配比。部分案例中,添加市政污泥后,矿山土壤中速效 K 浓度会有所降低,这一方面是由于供试土壤本身速效 K 浓度较高,另一方面则是长期的植物种植吸收了土壤中的速效 K^[5,13]。但速效 K 浓度的变化对植物生长的影响尚不清晰。对于弱碱性矿山,施用市政污泥后土壤 pH 值会小幅下降,而酸性矿山则恰恰相反,这体现了市政污泥较强的酸碱缓冲能力^[2],可用于过酸性或过碱性土壤的改良。除了以上指标外,市政污泥的添加还会显著提升矿山土壤的入渗率、田间持水量、CEC(阳离子交换量)和保水保肥能力^[3,14]。整体而言,随着市政污泥施用量的加大,以上理化性质会逐渐改善,但考虑到次生污染的风险因素,目前研究中市政污泥的施用量基本都会控制在 40% 以内(质量比)。此外,现阶段的研究中还缺少对更为广泛的土壤指标的监测,如微生物群落、腐殖酸含量、盐含量、有机污染物等,这些指标对于评估市政污泥施用后的效果同样重要,需要进一步深入研究。

2 市政污泥稳定产物用于矿山修复的生态效益

2.1 改良矿山土壤理化性质

土壤的各项理化指标可以准确反映土壤环境的优劣,是评测土壤生态的重要参数。矿山废弃地由于长期开采和破坏,表土层往往营养物质匮乏,而市政污泥的施入直接影响着土壤的理化性质和养分含量^[2,5-6,13-14]。随着市政污泥发酵产物的施用,土壤有机质和有效 N、有效 P 的浓度会得到显著提升,而土壤密度会显著下降,且由于矿山土壤性质、市政污泥性质和添加量的不同,变化幅度的波动较大,如有机质质量分数增加量就在 0.5%~8.0% 波动,见表 1。

2.2 阻断矿山淋溶污染

酸性矿山(煤矿、硫铁矿等)由于硫化物的不断氧化,往往伴随着大量酸性矿山废水(Acid mine drainage, AMD)。从源头上阻断硫化物的氧化,阻止 AMD 的形成,是解决酸性冲淋污染最高效的方法^[4,15]。现有研究表明,市政污泥及其附加产物是源头治理 AMD 的有效材料^[15-19]。一方面,市政污泥稳定产物,如厌氧消化产物,具有很低的屏障渗透系数,呈现出良好的水力屏障特性,压实后可取代黏土或人工合成材料,作为阻断屏障基材铺设在矿山表面,阻断硫化物与空气和水的接触,避免 AMD 的产生和扩散^[15]。HERRMANN 等^[16]研究发现,市政污泥厌氧消化产物与粉煤灰的混合物经过重型击实后,渗透系数比废弃物处置场顶部盖层渗透系数的要求还要低 1 个数量级,可满足防渗要求。另一方面,可以利用市政污泥稳定产物中的大量厌氧微生物活动引起的还原反应,降低矿山表面的氧逸度和抑制嗜酸硫杆菌的活性,阻断硫离子的氧化^[15,17]。在密闭的废弃场地中,厌氧微生物的生物活动导致的强烈还原环境可有效控制硫离子的氧化过程,进

而使除了 Fe、Mn 之外几乎所有的重金属都得到有效固定^[15]。

市政污泥稳定产物在用于受重金属污染的土壤修复时,对部分重金属具有较好的固化效果。有研究表明,在重金属污染土壤中加入质量分数为 30%(湿重)的碱性市政污泥发酵产物后,Zn、Pb 和 Cd 的浸出量分别减少 99.54%、99.60%、99.85%^[18]。与粉煤灰共同发酵后的市政污泥施用于污染土壤后,其中 Cu、Pb、Zn、Mn 的可交换态和有机结合态的含量明显下降,而铁锰氧化物结合态和残渣态含量则会提高^[19]。目前关于市政污泥稳定产物固定重金属的机理研究并不清晰,但有学者认为市政污泥的添加改变了土壤的 pH-Eh,使得体系中发生了吸附反应、沉淀反应及硫酸盐还原反应,导致重金属被污泥或者其他化学物沉淀吸附^[9]。厘清重金属固化的关键性影响因素及机理,如市政污泥酸碱度、微生物组成、腐殖酸含量、辅料种类等参数对固化重金属的影响,将有助于研发市政污泥用于重金属高效固化的技术和产品。

2.3 强化矿山植被恢复和植物修复效果

矿山植物修复是利用植物耐受性和对特定重金

属的超累积效应来治理矿山土壤重金属污染的技术。相较于物理法和化学法,植物修复技术往往效果好、成本低,且修复过程不易造成二次污染,是目前矿山修复应用前景较好的技术^[12,20]。但是该技术也存在一定的局限性:一方面,修复进展主要依赖于植物的生长速度和对重金属的亲合性,修复周期漫长;另一方面,重金属从不易吸收的有机结合态、碳酸盐结合态或铁锰氧化物结合态向易吸收的离子态之间的转化缓慢,严重影响着植物的吸收效率,如 ROBINSON 等^[21]指出当生物积累系数为 10 时,若要将土壤中金属浓度降低 50%,需要约 25 a 的时间。

基于以上问题,市政污泥强化植物对矿山土壤的修复效果主要体现在 2 个方面。一是促进植物快速生长和提升单位面积生物量,以增加重金属吸收量。刘强等^[22]研究发现,当施用堆肥市政污泥的质量比例为 0~10%(干重)时,随着比例增加,高羊茅株高度可由 12.5 cm 提高到 35.0 cm,生物量(干重)可由 4.28 mg 增加到 13.50 mg。二是可以显著提升植物对重金属的富集程度,加快富集速度。市政污泥施入土壤后,重金属向植物上部富集的速率与土壤性质、重金属形态和植物种类密切相关^[23],见表 2。

表 2 市政污泥促进植物修复案例
Table 2 Cases of sewage sludge promoting phytoremediation

重金属类别	植物、作物类别	发酵污泥施用质量比例/%	实验期限/月	施用发酵污泥的效果	参考文献序号
Zn	高羊茅	0~20	2.5	随着发酵市政污泥施用量提高,株高提升 112%~180%,Zn 富集量提升 111%~250%;但当施用量达到 20%时,种子发芽率会显著降低	[22]
Cr、Ni	万寿菊	0~20	2.5	株高提升 86%~113%,Cr 富集量提升 260%~632%,Ni 富集量提升 218%~626%;但当施用量超过 10%时,效果会显著降低	[22]
Cd	玉米	0~50	1.0	添加量为 1%~5%时,株高提升 115%~122%,Cd 富集量提升 50%~83%;但当施用量超过 5%时,玉米株高和重金属富集系数开始降低	[24]
Cu、Pb	鸭跖草	0~60	3.0	当市政污泥添加比例为 15%时,鸭跖草的生长情况最为良好,污染土壤中 Cu、Pb 的去除率可分别提升约 420%、600%	[25]
Cu、Cr、Ni	波斯菊	10	2.0	与空白对照组相比,添加 10%发酵市政污泥后,波斯菊中 Cr、Cu 和 Ni 含量增加比例分别为 22.4%、46.5%、92.3%	[26]
Cu、Zn	芥菜	0~10	1.4	当添加 6%的发酵市政污泥时,芥菜生物量和金属吸收效率均达到最大,对 Cu、Zn 的吸收效率分别增高 26.4%、27.3%	[27]

由表 2 可看出,针对不同的重金属污染,在施用市政污泥和选种相应的富集植物后,重金属的富集程度和植物的生物量,都有了显著提升,如市政污泥添加量为 10%(干重)时,万寿菊对 Cr 的富集量可提升 632%之多^[22]。但同时,这些研究都显示出一个极为重要的特点,即随着市政污泥量的增加,植物的生长速率和重金属富集效率都会显著降低,甚至会低于空白对照组,施用的最佳质量比例一般为 5%~

20%^[22,25-27]。

市政污泥促进植物吸收重金属的机理,一般认为是污泥中的组分改变了土壤的理化性质,导致了重金属的活化,进而提高了植物的吸收效率^[6,28-29]。刘爽等^[6]研究发现土壤的脲酶活性会随着市政污泥施加量的加大而提高,而脲酶活性是影响土壤中各重金属可交换态含量的关键因素。此外,市政污泥中含有大量的富里酸和小分子有机酸,可与金属离

子形成可溶性络合物,从而增强金属离子的活性和移动性^[28-29]。需要注意的是,经石灰稳定化处理或者添加磷尾矿渣的发酵,市政污泥反而会将重金属进一步固定,从而显著降低植物对重金属的吸收量^[26,30]。如果选择在矿山进行简单的植物复绿,而非重金属超累积去除,那么选择具有重金属钝化效果的市政污泥配方,会有更佳的效果。

3 市政污泥稳定产物应用于矿山修复的环境风险分析

3.1 重金属污染环境风险

次生污染风险是市政污泥土地利用过程中需要面对的问题,而对于亟待解决重金属污染的矿山土壤来说,避免市政污泥中的重金属加大矿山污染风险是市政污泥在该场景中安全使用的前提。有研究表明,当市政污泥产物按 15%~60% 湿重比例与矿山土壤混合后,土壤中的 Pb、Zn、Cd 质量分数分别增加了 4.01%~5.69%、6.16%~20.67%、1.58%~5.98%,其中,当市政污泥施用比例不超过 15% 时,重金属含量增幅较小^[31]。金树权等^[32]通过马尼拉草坪盆栽试验发现,草坪基质的 Cr、Cd 和 Hg 含量会随市政污泥添加比例的增高而显著提高。由此可见,市政污泥的施用在一定程度上会造成矿山土壤中重金属的进一步累积。因此,如何控制市政污泥施用后的重金属累积风险就极为重要。除了控制施用量外,笔者认为,还可以从两方面入手:一是源头控制,即控制市政污泥本身的重金属含量,提高市政污泥稳定产物的品质;二是选择对重金属抗逆性较强的植物(如超积累植物),并结合重金属固化技术,降低矿山土壤重金属的溶出风险。

3.2 盐分及 N、P 等物质输入风险

除了重金属外,施用市政污泥稳定产物导致的土壤盐分和 N、P 等物质含量的增高也可能进一步引发环境问题。如含盐量较高的市政污泥产物,在施用后会提高土壤的氯离子浓度和含盐量,进而影响盐敏感植物的生长,且阳离子之间的拮抗作用也会影响植物对营养物质的吸收平衡^[25]。此外,由于矿山开采破坏了地表岩石结构,使得地表径流很容易携带冲淋物质进入地下水系统。在瑞典 Kristineberg 铜尾矿区,市政污泥稳定产物施用后,其中的有机质、硝酸盐、磷酸盐被大量释放后进入地下水,造成污染^[33]。但由于目前除重金属风险之外的研究仍然较少,很难定量分析市政污泥其他组分对矿山环境的影响,且缺少施用后的污染评估方法,需要进行更进一步的研究。

3.3 市政污泥稳定产物用量不明确

市政污泥在废弃矿山的施用除了要求其理化性质达标外,市政污泥稳定产物施用量也应得到科学规范。但现有的标准和规范中很少有针对性的统一要求,仅 DBJ/T 45-003—2015《广西城镇污水处理厂污泥产物土地利用技术规范》中提到了市政污泥在废弃矿山的施用标准:在采取有效工程措施的前提下,施用量不用限制。而 GB/T 24600—2009《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》中则要求市政污泥用于土壤改良时年施用量不超过 30 t/hm²。对于矿山来说,低于 30 t/hm² 的施用量又不适用于矿山土壤贫瘠的现状,无法满足矿山的修复需求。但市政污泥的施用量并非越多越好,当超过某一限值后,植物的存活率和生物量会显著下降,甚至低于不加市政污泥的空白对照组^[6,22,25],这表明当市政污泥中的有害物质在土壤中逐渐积累时,会产生较大的生态毒性。

不同的研究中,市政污泥用于矿山生态修复的施用量差异较大。在实际的工程实践中,邹惠等^[34]研究发现,当市政污泥的施用量不超过 120 t/hm² 时,引发次生污染的风险较低。在铜矿山和煤矿山等容易产酸的废弃场地中,当发酵市政污泥施用量小于 30% (湿重) 或者介于 15~45 t/hm² 时,均能在控制土壤污染风险的同时,达到良好的植物修复效果。根据前人研究结果和污泥品质差异,在符合 GB/T 24600—2009 要求的情况下,小于 20% (湿重) 是市政污泥施用量的一个相对安全范围^[22,26-27,31]。此外,现有研究中市政污泥的施用方式,多是直接与矿土混合使用,尚未研究不同施用方式(如沟施、撒施、制成粒肥或棒肥施用等)对植物生长的影响。

4 结论与展望

市政污泥在矿山生态修复方向具有较大的应用潜力,市政污泥的施用不仅可提升矿山土壤中的营养物质含量、改良土壤理化性质、加速植物生长,还可以强化植物对矿山土壤中重金属的富集效果,并持续阻断酸性淋溶水的产生,从根源上治理矿山的淋溶污染问题。但是在将市政污泥用于矿山生态修复时也需注意次生污染风险,尤其是重金属和盐分累积对植物的毒害效应,以及营养物质淋溶时对水体的富营养化影响。

考虑现有研究中的不足之处,厘清施用市政污泥稳定产物后引发的土壤理化性质变化对植物生长的长期影响、深化市政污泥稳定产物固定重金属的机理研究、定量分析市政污泥组分对矿山地下水的

影响、明确市政污泥稳定产物的最佳施用量和施用方式、建立市政污泥稳定产物施用后的污染评估方法等,将成为未来评估市政污泥用于矿山生态修复可行性的重要研究方向。

参考文献(References):

- [1] 水新芳,赵元艺,王强. 矿山重金属污染土壤修复技术进展及展望[J]. 地质论评, 2021, 67(3): 752-766.
SHUI Xinfang, ZHAO Yuanyi, WANG Qiang. Progress and prospect of remediation technology of heavy-metal-contaminated soil in mines[J]. Geological Review, 2021, 67(3): 752-766.
- [2] SEVILLA-PÉREA A, MINGORANCE M D. Field approach to mining-dump revegetation by application of sewage sludge co-compost and a commercial biofertilizer[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 158: 95-102.
- [3] PETROVA T, RUDZISHA E. Utilization of sewage sludge as an ameliorant for reclamation of technogenically disturbed lands[J]. Journal of Mining Institute, 2021, 251: 767-776.
- [4] 陈思思,董滨,徐祖信. 矿山生态修复及市政污泥稳定化产物应用潜力[J]. 中国环境科学, 2022, 42(12): 5734-5747.
CHEN Sisi, DONG Bin, XU Zuxin. Mine land ecological restoration and application potential of sewage sludge stabilization products[J]. China Environmental Science, 2022, 42(12): 5734-5747.
- [5] 赖发英,王国锋,孙永明,等. 城市污泥对矿区土壤性状的影响[J]. 核农学报, 2010, 24(2): 349-354.
LAI Faying, WANG Guofeng, SUN Yongming, et al. Effects of municipal sewage sludge on mine soil properties[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24(2): 349-354.
- [6] 刘爽,张淑琴,任大军,等. 城市污泥改良矿山废弃土壤的试验研究[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(4): 79-86.
LIU Shuang, ZHANG Shuqin, REN Dajun, et al. Experimental study on improvement of abandoned mine soil by urban sludge[J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(4): 79-86.
- [7] 戴晓虎,侯立安,章林伟,等. 我国城镇污泥安全处置与资源化研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 145-153.
DAI Xiaohu, HOU Li'an, ZHANG Linwei, et al. Safe disposal and resource recovery of urban sewage sludge in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 145-153.
- [8] 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.
- [9] 查金,贾宇锋,刘政洋,等. 市政污泥堆肥对矿山废弃地生态恢复影响的研究进展[J]. 环境科学研究, 2020, 33(8): 1901-1910.
ZHA Jin, JIA Yufeng, LIU Zhengyang, et al. Research advances on effect of municipal sewage sludge compost applied for abandoned mine ecological remediation[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(8): 1901-1910.
- [10] 谢计平. 矿山废弃地分析及生态环境修复技术研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2017, 37(6): 41-45.
XIE Jiping. Research progress of mine wasteland analysis and ecological environment restoration technology[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2017, 37(6): 41-45.
- [11] 方传棣,成金华,赵鹏大,等. 长江经济带矿区土壤重金属污染特征与评价[J]. 地质科技情报, 2019, 38(5): 230-239.
FANG Chuandi, CHENG Jinhua, ZHAO Pengda, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in soils of mining areas in the Yangtze River Economic Belt[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(5): 230-239.
- [12] 蒋文翠,杨继清,彭尔瑞,等. 矿山生态修复研究进展[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(4): 127-132.
JIANG Wencui, YANG Jiqing, PENG Errui, et al. Research progress of mine ecological restoration[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(4): 127-132.
- [13] 周平. 昆明主城市政污泥泥质分析及其利用于磷矿山生态修复前景[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
ZHOU Ping. Analysis of municipal sludge quality in the main city of Kunming and its utilization prospects for ecological restoration of phosphorus mines[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [14] 彭维新,杨源通,冯嘉仪,等. 污泥及强化措施对稀土矿区废弃土壤的改良[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(5): 65-72.
PENG Weixin, YANG Yuantong, FENG Jiayi, et al. Improvement of sewage sludge and enhanced measure on soil of rare earth mine wasteland[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(5): 65-72.
- [15] 张庆. 压实污泥作为尾矿屏障的可行性及微生物机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
ZHANG Qing. Feasibility & microbial mechanisms of compacted sewage sludge as a barrier for tailings[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.
- [16] HERRMANN I, SVENSSON M, ECKE H, et al. Hydraulic conductivity of fly ash-sewage sludge mixes for use in landfill cover liners[J]. Water Research, 2009, 43(14): 3541-3547.
- [17] ANUNGSTRI R, PRASETYA A, BAYU H T. Passive removal of sulphate and heavy metals from acid mine drainage using sewage sludge and fly ash[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023(1): 012076.
- [18] 李翔,宋云,刘永兵. 石灰干化污泥稳定后土壤中Pb、Cd和Zn浸出行为的研究[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1946-1954.
LI Xiang, SONG Yun, LIU Yongbing. Leaching behavior of Pb, Cd and Zn from soil stabilized by lime stabilized sludge[J]. Environmental Science, 2014, 35(5): 1946-1954.
- [19] 余观梅. 粉煤灰对污泥中重金属的钝化作用及其在园林绿化应用的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
YU Guanmei. Stabilization of heavy metals of sewage sludge amended with coal fly ash and the study of stabilized sewage sludge application to green area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [20] 胡亮,贺治国. 矿山生态修复技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(4): 40-45.
HU Liang, HE Zhiguo. Research progress of ecological restoration technology in mines[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(4): 40-45.
- [21] ROBINSON B H, ANDERSON C W N, DICKINSON N M. Phytoextraction: Where's the action? [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 151: 34-40.
- [22] 刘强,陈玲,邱家洲,等. 污泥堆肥对园林植物生长及重金属积累的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 870-875.
LIU Qiang, CHEN Ling, QIU Jiazhou, et al. Effects of sewage sludge compost on growth and heavy metal accumulation in horticultural plants[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(6): 870-875.
- [23] NUNES N, RAGONEZI C, GOUVEIA C S S, et al. Review of sewage sludge as a soil amendment in relation to current international

- guidelines: A heavy metal perspective [J]. Sustainability, 2021, 13(4):2317.
- [24] 曾正中,高冬香,苟剑峰,等.堆肥污泥施入黄土对植物生长及Cd吸收的影响[J].环境工程学报,2015,9(8):3985-3990.
- ZENG Zhengzhong,GAO Dongxiang,GOU Jianfeng,et al. Impact of composted sludge into loess on plant growth and Cd uptake of heavy metals test [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015,9(8):3985-3990.
- [25] 潘志强.城市污泥联合植物改良修复废弃矿区土壤的研究[D].武汉:武汉科技大学,2020.
- PAN Zhiqiang. Study on soil improvement and remediation in abandoned mining area by plant with sewage sludge [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020.
- [26] 李玉.污泥堆肥用于矿山生态恢复中重金属的释放及迁移[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2018.
- LI Yu. Release and migration of heavy metals in sewage sludge compost application for abandoned mining land revegetation [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018.
- [27] HUANG H L, LUO L, HUANG L H, et al. Effect of manure compost on distribution of Cu and Zn in rhizosphere soil and heavy metal accumulation by brassica juncea [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2020, 231(5):195.
- [28] SARKAR D, ANDRA S S, SAMINATHAN S K M, et al. Chelant-aided enhancement of lead mobilization in residential soils [J]. Environmental Pollution, 2008, 156(3):1139-1148.
- [29] GUSIATIN Z M, KULIKOWSKA D, KLIK B. Suitability of humic substances recovered from sewage sludge to remedy soils from a former as mining area - a novel approach [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 338:160-166.
- [30] MINGORANCE M D, FRANCO I, ROSSINI-OLIVA S. Application of different soil conditioners to restorate mine tailings with native (*Cistus ladanifer* L.) and non-native species (*Medicago sativa* L.) [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, 174:35-45.
- [31] 潘志强,张淑琴,任大军,等.城市污泥的直接施用对矿区土壤修复的影响[J].环境工程,2019,37(11):189-193.
- PAN Zhiqiang, ZHANG Shuqin, REN Dajun. Effects of direct application of sewage sludge on soil remediation in abandoned mining area [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(11):189-193.
- [32] 金树权,周金波,陈若霞,等.污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响[J].环境科学,2013,34(10):3969-3974.
- JIN Shuquan, ZHOU Jinbo, CHEN Ruoxia, et al. Effects of sludge compost used as lawn medium on lawn growth and soil and water environment [J]. Environmental Science, 2013, 34(10):3969-3974.
- [33] NASON P, ALAKANGAS L, ÖHLANDER B. Impact of sewage sludge on groundwater quality at a formerly remediated tailings impoundment [J]. Mine Water and the Environment, 2014, 33(1):66-78.
- [34] 邹惠,刘凯,于玲玲,等.堆肥污泥中重金属形态分布及在矿山复垦过程中迁移转化研究[J].环境科学与管理,2022,47(9):43-47.
- ZOU Hui, LIU Kai, YU Lingling, et al. Speciation distribution of heavy metals in compost sludge and transformation in mine reclamation the process of [J]. Environmental Science and Management, 2022, 47(9):43-47.

(责任编辑:林桂玲)

(上接第153页)

- [16] 唐李斌,吴基文,毕尧山,等.基于AHP-熵权法耦合的含水层富水性评价研究[J].中国矿业,2020,29(12):147-152.
- TANG Libin, WU Jiwen, BI Yaoshan, et al. Evaluation of aquifer water abundance based on AHP-entropy weight method [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(12):147-152.
- [17] 徐慧.煤矿含水层富水性“双测”技术[J].煤炭技术,2021,40(2):43-47.
- XU Hui. “double measurement” technology of water-rich aquifer in coal mine [J]. Coal Technology, 2021, 40(2):43-47.
- [18] 代革联,王松松,牛超,等.基于G1-CV熵组合权重模型的含水层富水性研究[J].煤炭技术,2023,42(8):132-138.
- DAI Gelian, WANG Songsong, NIU Chao, et al. Study on aquifer water richness based on G1-CV entropy combined weight model [J]. Coal Technology, 2023, 42(8):132-138.
- [19] 葛如涛,陈陆望,王迎新,等.基于改进AHP法和CRITIC法耦合赋权的松散承压含水层富水性评价[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(4):519-528.
- GE Rutao, CHEN Luwang, WANG Yingxin, et al. Water abundance assessment on unconsolidated confined aquifer based on the coupling of improved AHP and CRITIC [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2023, 46(4):519-528.
- [20] 熊凡,李沛鸿,袁逸敏,等.基于GIS和组合赋权的城市洪涝灾害风险评估[J].人民长江,2023,54(8):60-66.
- XIONG Fan, LI Peihong, YUAN Yimin, et al. Urban flood disaster risk assessment based on GIS and combined weights [J]. Yangtze River, 2023, 54(8):60-66.
- [21] LIU W T, HAN M K, MENG X X, et al. Mine water inrush risk assessment evaluation based on the GIS and combination weight-cloud model: A case study [J]. ACS Omega, 2021, 6(48):32671-32681.
- [22] 孙魁,苗彦平,陈小绳,等.鄂尔多斯盆地北部直罗组赋存特征及富水性[J].煤炭学报,2022,47(10):3572-3598.
- SUN Kui, MIAO Yanping, CHEN Xiaosheng, et al. Occurrence characteristics and water abundance of Zhiluo Formation in northern Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10):3572-3598.

(责任编辑:陈玉涛)