

污泥堆肥部分替代化肥对铬污染耕地玉米生长的影响

曹迟, 周晓天, 高羽欣, 马中文, 王垚, 应纯洋, 谢君豪, 周福红, 蒋浩永, 马友华

引用本文:

曹迟, 周晓天, 高羽欣, 马中文, 王垚, 应纯洋, 谢君豪, 周福红, 蒋浩永, 马友华. 污泥堆肥部分替代化肥对铬污染耕地玉米生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(11): 2453-2463.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0160>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无害化污泥堆肥施用量对沙质潮土土壤活性有机碳组分的影响

郭康莉, 冀拯宇, 刘晓, 朱兴娟, 姜慧敏, 杨俊诚, 李桂花, 张建峰

农业环境科学学报. 2018, 37(1): 105-113 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0940>

猪场粪水施用对设施白菜及土壤重金属的影响

程娟, 刘沐衡, 肖能武, 杨柳, 杜会英, 杜连柱, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2559-2567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1030>

化肥有机肥配施对盐渍化土壤氨挥发及玉米产量的影响

周慧, 史海滨, 徐昭, 郭珈玮, 付小军, 李正中

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1649-1656 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1406>

三种有机物料组成性质及其对土壤Cd形态与水稻Cd含量的影响

刘高云, 柏宏成, 叶碧莹, 魏世强

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1844-1854 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1461>

施用生物炭对重金属污染农田土壤改良及玉米生长的影响

李衍亮, 黄玉芬, 魏岚, 黄连喜, 黄庆, 许桂芝, 刘忠珍

农业环境科学学报. 2017, 36(11): 2233-2239 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0522>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曹迟, 周晓天, 高羽欣, 等. 污泥堆肥部分替代化肥对铬污染耕地玉米生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(11): 2453-2463.

CAO C, ZHOU X T, GAO Y X, et al. Effects of partial replacement of chemical fertilizer with sludge compost on maize growth in chromium-contaminated farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(11): 2453-2463.

污泥堆肥部分替代化肥对铬污染耕地玉米生长的影响

曹迟¹, 周晓天¹, 高羽欣¹, 马中文¹, 王垚¹, 应纯洋¹, 谢君豪¹, 周福红², 蒋浩永², 马友华^{1*}

(1. 农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 明光市农业技术推广中心, 安徽 明光 239400)

摘要:为探索污泥堆肥在铬污染耕地上的资源化合理利用, 本研究通过田间试验, 设置了空白对照、常规施肥、单施污泥堆肥以及不同比例污泥堆肥替代化肥配施处理, 并将其与有机肥替代化肥进行效果对比, 从玉米生物量、铬吸收、土壤铬含量及其有效性等方面探讨污泥堆肥施用对作物生长和土壤铬累积的影响。结果表明: 相比于对照, 不同用量污泥堆肥均能促进玉米生长, 显著提高玉米产量, 增产范围为15.24%~36.65%, 其中污泥堆肥替代20%化肥配施对玉米的增产效果最好, 相较于常规施肥增产了7.16%。各替代化肥处理下玉米籽粒中重金属铬含量均低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)中的限值, 其中污泥堆肥30%替代化肥处理玉米籽粒降铬效果最好。污泥堆肥施用量在750~1 500 kg·hm⁻²时玉米地上部分对铬的携出量大于污泥堆肥的携入量。当季施用污泥堆肥对土壤总铬含量无显著影响, 且各替代化肥处理下土壤有效态铬含量相较对照降幅为5.59%~12.68%。施用污泥堆肥不会对作物产生盐害并且能够缓解土壤酸化、提高土壤有机质、全氮以及速效氮磷钾含量。综合来看, 在铬污染耕地, 污泥堆肥替代化肥施用不仅有利于提高玉米产量, 还能显著降低籽粒铬含量, 并且施用量为1 500 kg·hm⁻²时即能保障玉米安全、高产, 且不会对土壤造成富集铬的风险, 并能有效提高土壤各养分指标。

关键词: 玉米; 污泥堆肥; 铬; 污泥农用; 土壤; 养分; 作物产量

中图分类号: X703; S513 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)11-2453-11 doi:10.11654/jaes.2023-0160

Effects of partial replacement of chemical fertilizer with sludge compost on maize growth in chromium-contaminated farmland

CAO Chi¹, ZHOU Xiaotian¹, GAO Yuxin¹, MA Zhongwen¹, WANG Yao¹, YING Chunyang¹, XIE Junhao¹, ZHOU Fuhong², JIANG Haoyong², MA Youhua^{1*}

(1. Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention and Control of Anhui Province, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Mingguang Agricultural Technology Extension Center, Mingguang 239400, China)

Abstract: To explore the rational utilization of sludge compost on chromium-contaminated farmland, a field experiment was conducted to investigate the effects of sludge compost application on crop growth and soil chromium accumulation. The experiment included blank controls, conventional fertilization, single application of sludge compost, and different ratios of sludge compost replacement for chemical

收稿日期: 2023-03-05 录用日期: 2023-05-05

作者简介: 曹迟(1998—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 从事土壤重金属污染修复研究。E-mail: caochi1998zf@163.com

*通信作者: 马友华 E-mail: yhma@ahau.edu.cn

基金项目: 安徽省科技重大攻关项目(17030701053); 安徽省耕地土壤改良与安全利用集中推进示范展示基地建设项目(皖农办科函[2021]195)

Project supported: Major Science and Technology Project of Anhui Province (17030701053); Construction Project of Demonstration and Demonstration Base for Centralized Promotion of Soil Improvement and Safe Utilization of Cultivated Land in Anhui Province (Anhui Agricultural Office Science Letter[2021]195)

fertilizers. Organic fertilizers were also used as a control. The results were examined from the perspectives of maize biomass, chromium absorption, and soil chromium content and its effectiveness. Results revealed that different amounts of sludge compost could promote maize growth and significantly increase maize yield, in the range of 15.24%–36.65%, compared with the control. The treatment with 20% sludge compost replacement for chemical fertilizers exhibited the best yield increase, with a 7.16% increase compared to conventional fertilization. The heavy metal chromium content in maize grains under each replacement fertilizer treatment was lower than the limit values in the standard GB 2762—2022, and the treatment with 30% sludge compost replacement for chemical fertilizers exerted the best effect in reducing chromium content in maize grains. The amount of chromium leached from the maize aboveground was greater than the amount of chromium brought in by the sludge when the application rate of sludge compost was between 750 kg·hm⁻² and 1 500 kg·hm⁻². The application of sludge compost during the season had no significant effect on the total soil chromium content, and the effective soil chromium content under each replacement fertilizer treatment decreased by 5.59% to 12.68% compared to the control. The application of sludge compost did not cause salt damage to crops and could alleviate soil acidification, increase soil organic matter, and improve the contents of total nitrogen, available phosphorus, and potassium. In summary, the application of sludge compost as a replacement for chemical fertilizers on chromium-contaminated farmland not only improves maize yield but also significantly reduces grain chromium content. An application rate of 1 500 kg·hm⁻² can ensure safe and high yield of maize without the risk of chromium accumulation in the soil, as well as effectively improving soil nutrient indicators.

Keywords: maize; sludge compost; chromium; sewage sludge utilization; soil; nutrient; crop yield

铬(Chromium, Cr)作为工业生产中的重要原料,同时也是一种环境污染物^[1]。随着铬及其化合物被广泛应用于冶金、电镀、制革等工业领域,以及生产过程中含铬废液、废气的不当处理,周边地区的土壤和水体遭受到不同程度的污染^[2]。《2014年全国土壤污染状况调查公报》显示,土壤铬超标点位占全国土壤总超标点位的近7%^[3]。陈文轩等^[4]根据文献调研结果,对我国农田土壤重金属平均含量的分布进行分析,结果显示我国各行政区农田土壤重金属铬平均含量超过当地土壤背景值的平均倍数为0.93,其中上海市农田土壤重金属铬平均含量最高,达74.9 mg·kg⁻¹。有研究表明我国耕地土壤中铬含量范围为0.05~3 353.60 mg·kg⁻¹,平均值为78.94 mg·kg⁻¹,显著高于背景值(57.30 mg·kg⁻¹)^[5]。农田土壤中的重金属铬易被作物吸收,并通过食物链进入人体,从而对人类健康造成严重威胁。铬的环境污染问题已经引起世界各地的广泛关注^[6],铬污染农田修复对确保土壤安全和农业可持续发展至关重要。

在我国,由于化肥的不断投入以及新型肥料的研究,作物产量大幅度增加,粮食问题得以改善。然而,增施化肥同时会造成土壤退化、温室气体排放等一系列环境问题^[7]。研究表明,作物对氮肥的吸收利用率仅为30%,大量氮肥的施用导致氮肥利用效率低下,并且化肥不合理施用和过量投入,会导致施入土壤的营养流失并给环境带来严重危害^[8]。相关学者发现过度施用化肥使得土壤出现酸化、板结以及肥力下降等现象^[9]。土壤酸化导致植物毒害元素活性增加,土

壤有益元素(如钙、镁、钾)的含量或活性降低,给植物生长发育造成危害,严重制约了中国农业的可持续发展。因此,合理的有机物料替代化肥是提高化肥利用率、实现化肥施用零增加目标和农业可持续发展的重要途径^[7]。

污泥作为城镇污水的终端副产物,富含大量的有机质以及丰富的氮、磷、钾等元素,微生物活性也较高。结合我国资源节约型和环境友好型社会发展需求,污泥的无害化、资源化利用技术已成为研究热点。大量研究表明,经过无害化处理后的污泥产物可以大幅度减少污泥中潜在污染物和细菌病原体等有害物质,具有较广阔的应用前景^[10-11]。并且污泥堆肥的施用对增加土壤养分供应强度,提高土壤养分和有机碳含量,减少化学肥料的施用量,改善土壤酸化的显著作用已得到国内外学者的一致认可^[12-13]。同时污泥堆肥中含有大量有机质,施用会提高土壤中团聚体的稳定性和孔隙度等进而改善土壤理化性质^[14]。因此污泥农用被认为是最经济的污泥处置方式之一^[14]。然而污泥中含有多种重金属,对环境造成的危害性未知^[15-16]。李淑芹等^[17]的研究结果表明,随着污泥堆肥施入量的增加,土壤中重金属总量也逐渐增加。此外,还有研究表明,土壤中施用好氧消化污泥虽短期内提高了土壤重金属有效性,但随着时间的增加,土壤重金属有效性也会降低,这与污泥较低的重金属全量和较高的有机质含量有关^[18]。同时污泥中大量的有机质及低的pH也有利于金属与有机质之间的络合^[19-22]。根据Yu等^[23]的报道,施用污泥后土壤中重金

属的生物有效性降低。并且污泥带来的碱性物质,对提高土壤pH以及促进铬在土壤中的吸附起着重要作用^[16]。

鉴于此,为探究污泥堆肥在铬污染耕地上的合理施用方式,明确安全施用量,本试验采用田间试验,通过设置不同比例污泥堆肥替代化肥施用,并与商品有机肥部分替代化肥处理进行对比,研究不同污泥堆肥替代化肥比例对玉米生长、玉米各部位铬含量、土壤养分、土壤重金属铬含量及其有效性的影响,本文旨在为污泥堆肥在铬污染耕地上的资源化利用提供科学依据与实践参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试玉米品种为登海511,适宜安徽省淮河以北地区夏播种植;供试污泥堆肥为脱水生活污泥室外堆沤自然腐熟后产物;供试肥料与商品有机肥均来自当地市场。复合肥含氮磷钾45%(15:15:15),尿素含纯氮量(N)46%,商品有机肥经过堆肥好氧发酵。

供试有机物料的理化性状及重金属含量见表1。供试污泥堆肥的各项指标(包括污染物、卫生学及理化指标)均符合《农用污泥污染物控制标准》(GB

4284—2018)规定的A级农用污泥限值;商品有机肥重金属含量均符合《有机肥料》(NY/T 525—2021)规定的限值。

1.2 试验区概况

试验地位于安徽省东部某铬污染耕地,试验区面积约800 m²,地势平坦,土壤亚类为基性岩火山灰土,成土母质为玄武岩风化的残坡积物。供试土壤基本理化性质见表2。

试验田前茬种植水稻,土壤重金属总镉0.11 mg·kg⁻¹,总汞0.048 mg·kg⁻¹,总铅15.2 mg·kg⁻¹,总铬255.73 mg·kg⁻¹。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)要求,土壤总铬含量高于筛选值(250 mg·kg⁻¹),但低于农用地土壤污染风险管控值(800 mg·kg⁻¹),土壤有效态铬含量为0.557 mg·kg⁻¹。

1.3 试验设计和样品处理

试验采用田间小区设计,根据农业投入品类型与用量的不同,试验设8个处理(表3):(1)空白对照(CK);(2)常规施肥(NP);(3)单施污泥堆肥7 500 kg·hm⁻²(S₇₅₀₀);(4)污泥堆肥替代化肥10%(NPS₇₅₀);(5)污泥堆肥替代化肥20%(NPS₁₅₀₀);(6)污泥堆肥替代化肥30%(NPS₂₂₅₀);(7)污泥堆肥替代化肥40%(NPS₃₀₀₀);(8)商品有机肥替代化肥20%(NPO₁₅₀₀)。每个处理重复3次,随机排列,共24个小区,每个试验小区规格为长6 m,宽4 m,面积为24 m²,在试验地四周设置保护行,复合肥和有机物料作为基肥一次性施入,大喇叭口期追施尿素,清洁水灌溉,截断污染源。

供试玉米于2021年6月28日种植,种植密度55 500株·hm⁻²(60 m×30 m)。每小区定点10株,随着玉米生长并标记叶片,成熟期调查主茎叶数,并测定玉米的株高,算出平均值。样品于2021年10月1日成熟期采集,玉米成熟期进行实收测产。玉米植株样品按五点取样法每个小区采集5整株,带回实验室后将玉米植株样品分为根系、秸秆、穗轴和籽粒4部分。植株先用自来水清洗干净,再用去离子水清洗。将样品放入105℃烘箱中进行杀青,30 min后再调至75℃的烘箱内烘干并称质量,最后利用不锈钢粉碎机粉碎后过

表1 供试有机物料与《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)指标比较

Table 1 Comparison of tested organic materials with the standard GB 4284—2018 on various indicators

序号 Number	指标 Index	农用范围 Range	污泥堆肥 Sludge composting	商品有机肥 Organic manure
1	pH	5.5~8.5	7.38	7.15
2	电导率EC/(mS·cm ⁻¹)	—	2.02	5.46
3	总养分(N+P ₂ O ₅ +K ₂ O)/%	3	6.56	5.7
4	有机质(以干基计)/(g·kg ⁻¹)	≥200	328	470
5	总Cd(以干基计)/(mg·kg ⁻¹)	<3	0.6	0.9
6	总Hg(以干基计)/(mg·kg ⁻¹)	<3	1.28	—
7	总Pb(以干基计)/(mg·kg ⁻¹)	<300	19.8	21.4
8	总Cr(以干基计)/(mg·kg ⁻¹)	<500	91.8	26.9
9	总Cu(以干基计)/(mg·kg ⁻¹)	<500	94	121.4

表2 供试土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of the tested soil

pH	电导率EC/ (mS·cm ⁻¹)	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Hydrolysable N/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)
5.34	0.12	22.20	1.13	130.86	10.07	119.25

表3 试验处理类型及材料用量(kg·hm⁻²)Table 3 Test treatment type and material dosage(kg·hm⁻²)

处理类型 Treatment	基肥 Compound fertilizer			追肥 Topdressing
	污泥堆肥 Sludge	有机肥 Organic fertilizer	复合肥 Compound fertilizer	尿素 Urea
CK	—	—	—	—
NP	—	—	600	150
S ₇₅₀₀	7 500	—	—	—
NPS ₇₅₀	750	—	525	150
NPS ₁₅₀₀	1 500	—	450	150
NPS ₂₂₅₀	2 250	—	375	150
NPS ₃₀₀₀	3 000	—	300	150
NPO ₁₅₀₀	—	1 500	450	150

注:除CK处理外,其余处理氮磷钾施用量保持一致,不足的养分分别用尿素、过磷酸钙、氯化钾补充,超过不补。

Note: With the exception of CK treatment, all other treatments maintained consistent levels of nitrogen, phosphorus, and potassium application. Insufficient nutrients were supplemented with urea, calcium superphosphate, and potassium chloride, while excess nutrients were not supplemented.

100目筛用于重金属含量测定。土壤样品在采集玉米样品当日采集,样品在阴凉处风干,研磨过100目筛和10目筛后用于土壤指标测定。

1.4 测定方法

玉米各部位中重金属含量采用《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016)测定;土壤有效态铬采用碳酸氢铵-二乙烯三胺五乙酸(AB-DTPA)提取^[24]测定;土壤总铬采用《土壤和沉积物 铜、锌、铅、镍、铬的测定 火焰原子吸收分光光度法》(HJ 491—2019)测定;常规方法测定土壤基本理化指标^[25];土壤电导率用电导仪测定(水土比5:1)。以国家标准参比物质[土壤样品(GBW07461)和植物

样品(GBW10012)]进行质量控制,标准物质分析结果均在允许误差范围内。

1.5 数据分析

数据采用Excel 2016和SPSS 23.0进行整理分析。数据表示为平均值±标准差,用Duncan's检验显著性差异($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对玉米生物量和农艺性状的影响

2.1.1 玉米成熟期各部位生物量的差异

表4表明,玉米根系、秸秆、穗轴、籽粒的生物量及产量间均存在显著差异。由表4可以看出,在不同处理下,玉米籽粒生物量为90.3~122.9 g·株⁻¹,玉米穗轴生物量为24.3~32.8 g·株⁻¹,秸秆生物量为182.5~262.4 g·株⁻¹,根系生物量为10.6~15.0 g·株⁻¹。与CK相比,不同处理均提高了玉米各部位的生物量,其中籽粒和秸秆生物量显著增加($P<0.05$)。

玉米产量在4 871~6 656 kg·hm⁻²之间。与CK相比,S₇₅₀₀处理玉米产量增加15.23%,且两种处理产量差异显著,说明施用污泥堆肥有助于提高玉米产量。各处理间产量结果显示,各替代化肥处理相较于NP处理玉米产量增幅在-2.24%~7.16%,其中NPS₃₀₀₀处理虽较NP处理下降了2.24%,但差异不显著;NPO₂₂₅₀处理玉米产量达到最高,且与NPO₁₅₀₀处理相比无显著差异。总体看来随着污泥堆肥替代化肥比例的提高,玉米产量呈先增加后降低的趋势,并且污泥堆肥替代化肥比例为30%时对玉米产量提高效果最好。

2.1.2 玉米不同生育期农艺性状的差异

不同处理对玉米穗期、成熟期株高及叶片数变化

表4 不同处理下玉米不同部位的生物量及实测产量

Table 4 Biomass yield of different parts of maize and output under different treatments

处理 Treatment	生物量/(g·株 ⁻¹)Biomass/(g·plant ⁻¹)				产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
	根系 Root	秸秆 Straw	穗轴 Cob	籽粒 Seed	
CK	10.6±1.0b	182.5±5.8d	24.3±2.3b	90.3±6.2c	4 871±43e
NP	13.4±1.0ab	238.1±11.3b	34.4±2.9a	114.7±5.7ab	6 211±63bc
S ₇₅₀₀	12.0±1.5ab	210.1±4.4c	27.7±3.4ab	103.6±3.7b	5 613±61d
NPS ₇₅₀	13.4±1.4ab	240.1±9.8b	30.7±3.1ab	114.7±4.7ab	6 211±71bc
NPS ₁₅₀₀	14.1±1.9a	258.7±6.6a	32.4±4.3a	116.4±3.6ab	6 305±61b
NPS ₂₂₅₀	15.0±1.3a	262.4±9.8a	32.0±4.2ab	122.9±6.0a	6 656±106a
NPS ₃₀₀₀	13.9±1.8ab	234.8±5.5b	30.9±2.4ab	112.1±7.9ab	6 072±115c
NPO ₁₅₀₀	14.3±1.8a	259.2±6.3a	32.8±4.1a	119.5±4.8a	6 512±83a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below.

的影响见图1、图2。可以看出,随着污泥堆肥替代化肥比例的增加,玉米不同生育期株高同样也呈现先增加后降低的趋势,但各处理间差异不显著;且除NPS₇₅₀处理外,其余替代化肥处理穗期及成熟期玉米株高均较NP处理增幅在0.76%~2.06%及0.43%~2.96%之间,NPS₂₂₅₀处理下玉米株高在穗期和成熟期均为最高。相比于CK,各处理下玉米穗期和成熟期的叶片数同样也有不同程度的提高,在玉米穗期和成熟期NPS₂₂₅₀处理的玉米叶片数均显著高于CK、NP及其他替代化肥处理。综上可见,不同污泥堆肥替代化肥处理总体上对玉米生长具有积极影响。

2.2 不同处理对玉米铬含量的影响

由表5可以看出,相同处理不同器官中铬含量均存在根系>茎秆>叶片>穗轴>籽粒的递减规律,而且地下部与地上部铬含量还存在显著差异。其中籽粒中铬含量变化范围为0.613~1.117 mg·kg⁻¹。参照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—

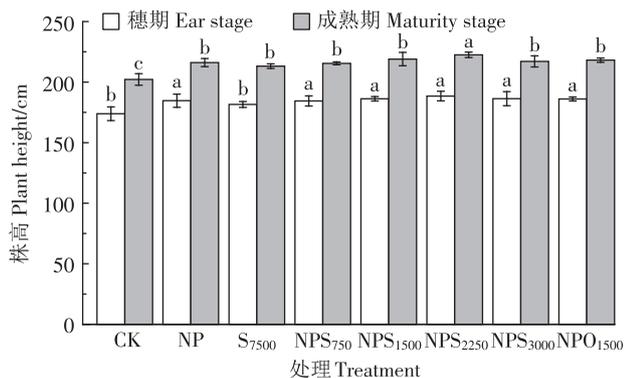


图1 穗期和成熟期不同处理玉米株高变化
Figure 1 Changes of plant height of maize under different treatments at ear and maturity stages

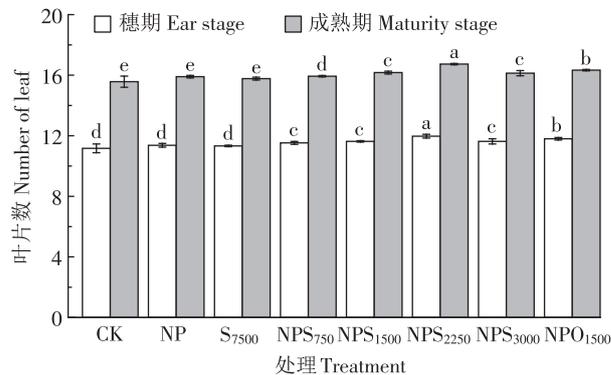


图2 穗期和成熟期不同处理玉米叶片数变化
Figure 2 Changes of leaf number of maize under different treatments at ear and maturity stages

2022)可知,除替代化肥处理,其余各处理的玉米籽粒部分铬含量虽超过限量值(Cr≤1),但并未超过《饲料卫生标准》(GB 13078—2017)的限量指标(Cr≤5),因此可作为饲料使用。

各处理下玉米籽粒铬较CK降低幅度在3.58%~40.07%,说明施肥在增产的同时也降低了玉米籽粒中铬的含量。各污泥堆肥替代化肥处理与NP处理相比,均有较好的降低玉米籽粒中铬的效果,其中NPS₂₂₅₀处理下玉米籽粒铬含量最低,降幅达40.65%。本试验表明污泥堆肥或商品有机肥与化肥配施能大幅度降低玉米籽粒铬含量,其中污泥堆肥替代化肥比例为30%时玉米籽粒铬含量降幅最高。

各处理穗轴、秸秆、根系中铬含量为0.764~1.396、9.350~14.080、36.820~51.013 mg·kg⁻¹。相较于CK,各处理均能有效降低玉米不同部位铬含量,并且在污泥堆肥替代化肥比例在10%~40%时,玉米组织中的铬含量与NP处理相比均有较大幅度的降低,说明污泥堆肥与化肥配施可以降低玉米穗轴、秸秆和根系对铬的吸收,其中NPS₂₂₅₀处理对玉米穗轴、秸秆、根系中铬

表5 不同处理下玉米各部位铬含量(mg·kg⁻¹)

Table 5 Chromium content in different parts of maize under different treatments(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	根系 Root	秸秆 Straw	穗轴 Cob	籽粒 Seed
CK	51.013±2.497a	14.080±0.883a	1.396±0.016a	1.117±0.012a
NP	46.217±0.574bc	13.257±0.772ab	1.278±0.032a	1.033±0.009b
S ₇₅₀₀	48.767±1.422ab	13.473±1.093a	1.373±0.016a	1.077±0.012ab
NPS ₇₅₀	44.247±1.199c	11.487±0.782bc	1.056±0.077b	0.847±0.062c
NPS ₁₅₀₀	40.390±1.835d	10.427±0.981cd	0.949±0.116bc	0.755±0.059d
NPS ₂₂₅₀	36.820±1.651e	9.350±0.859d	0.764±0.031e	0.613±0.025e
NPS ₃₀₀₀	39.710±0.615de	9.977±0.787cd	0.902±0.031cd	0.727±0.025d
NPO ₁₅₀₀	37.720±1.105de	9.500±0.939cd	0.810±0.039de	0.648±0.031e

含量的降低效果最好,降幅分别为40.22%、29.47%、20.33%。

2.3 不同处理对铬携入量与携出量的影响

本试验中铬携出量为玉米作物地上部(玉米籽粒、穗轴和秸秆)的重金属铬含量,分别与对应部位的公顷单产量的乘积之和。本试验土壤外源铬大部分是通过施用污泥堆肥或有机肥携入的,与施用量和铬的含量有关。

从表6中可以看出不同处理下玉米地上部对铬的携出量范围为136.299~183.824 g·hm⁻²,对比铬携入量和携出量,污泥堆肥施用量在2 250~7 500 kg·hm⁻²时携入铬的量远大于玉米铬的携出量,存在增加土壤环境铬污染的风险;而当污泥堆肥用量在750~1 500 kg·hm⁻²时,在铬污染耕地上玉米地上部对铬的携出量大于施用污泥堆肥对土壤铬的携入量,土壤不会出现引入外源铬的风险。

2.4 不同处理对土壤总铬及其有效性的影响

由表7可知,不同处理下土壤总铬含量为254.78~256.70 mg·kg⁻¹,但处理间无显著差异($P<0.05$),说明当季污泥堆肥施用量为750~7 500 kg·hm⁻²时对土壤总铬含量没有显著影响,但长期施用污泥是否会增加土壤中的铬积累还有待开展多年连续跟踪试验来进一步观察。

不同处理下土壤有效态铬含量在0.561~0.643 mg·kg⁻¹之间。与CK相比,各施肥处理土壤有效态铬含量均不同程度下降,其中替代化肥处理中,NPS₂₂₅₀处理对土壤有效态铬含量降低效果最好,且与其余处理差异显著,相较于CK,降低幅度为12.68%,说明在相同养分施用水平下,污泥堆肥或商品有机肥与化肥

表6 不同处理下铬携入量与玉米地上部铬携出量(g·hm⁻²)

Table 6 Chromium amounts input into soil and aboveground chromium content of Maize under different treatments(g·hm⁻²)

处理 Treatment	铬携入量 Chromium amounts input into soil	铬携出量 Chromium uptake by maize
CK	0	150.115±10.744b
NP	0	183.824±7.232a
S ₇₅₀₀	688.5	165.183±10.111ab
NPS ₇₅₀	68.9	160.671±15.626ab
NPS ₁₅₀₀	137.7	156.264±15.030ab
NPS ₂₂₅₀	206.6	142.049±16.285b
NPS ₃₀₀₀	275.4	136.299±12.911b
NPO ₁₅₀₀	39.2	142.723±16.057b

表7 不同处理下土壤总铬与有效态铬含量(mg·kg⁻¹)

Table 7 Contents of total chromium and available chromium in soil under different treatments(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	总铬 Total chromium	有效态铬 Available chromium
CK	254.85±0.37a	0.643±0.008a
NP	255.29±2.58a	0.617±0.003ab
S ₇₅₀₀	256.70±1.78a	0.635±0.004a
NPS ₇₅₀	254.78±0.60a	0.607±0.002b
NPS ₁₅₀₀	255.18±0.69a	0.590±0.003bc
NPS ₂₂₅₀	255.87±1.82a	0.561±0.012d
NPS ₃₀₀₀	256.09±1.83a	0.595±0.010b
NPO ₁₅₀₀	255.39±1.12a	0.567±0.028cd

配施对土壤有效态铬含量有较好的降低效果。

2.5 不同处理对土壤基本理化性质的影响

不同处理对土壤pH、有机质及氮磷钾含量的影响见表8,不同处理间土壤pH范围为5.30~5.37,相较于CK,各替代化肥处理土壤pH显著提高。单施污泥堆肥处理与各污泥堆肥替代化肥处理相较于NP处理土壤pH提高范围在0.05~0.07个单位,且随着污泥堆肥替代化肥比例的不提高,土壤pH呈现逐渐升高的趋势,但是处理间均未达到显著水平。可见污泥堆肥替代化肥处理总体上对土壤pH有显著积极作用,能减缓土壤酸化。各处理下土壤有机质含量为20.57~27.10 g·kg⁻¹,全氮含量为1.18~1.52 g·kg⁻¹,与NP处理相比,不同比例污泥堆肥替代化肥处理下土壤有机质和全氮分别提高5.93%~31.75%和15.13%~28.57%,并且随着替代比例的增加而增加。与CK相比,不同有机物料替代化肥处理均能增加土壤速效钾、碱解氮和有效磷含量,且随着替代比例增加其土壤养分含量呈现上升趋势。其中各施用污泥堆肥处理的土壤养分含量均显著高于CK,碱解氮、速效钾和有效磷分别比CK提高11.86%~33.91%、33.44%~58.92%和6.34%~33.57%。不同处理间土壤电导率与CK相比无显著差异,说明污泥的施用没有对土壤产生盐害。

3 讨论

3.1 污泥堆肥替代化肥对土壤pH及养分含量的影响

在本研究中,不同比例有机物料替代化肥均有利于土壤pH、有机质、全氮及有效养分含量的提升,在减少化肥施用的同时提升土壤肥力。在我国,土壤酸化使得土壤退化的同时也显著提升了土壤中重金属

表8 不同处理对土壤pH、有机质及氮磷钾含量的影响

Table 8 Effects of different treatments on soil pH, organic matter and nitrogen, phosphorus and potassium content

处理 Treatment	pH	电导率 EC/ (mS·cm ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Hydrolysable N/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)
CK	5.32±0.01b	0.12±0.01a	20.77±0.29d	1.18±0.01e	131.09±0.045f	9.96±0.22d	158.44±0.57f
NP	5.30±0.02b	0.12±0.01a	20.57±0.36d	1.20±0.01e	132.06±0.070f	10.09±0.22d	163.59±0.56e
S ₇₅₀₀	5.37±0.01a	0.13±0.01a	27.10±0.29a	1.52±0.02a	196.25±0.64a	13.36±0.47a	246.45±0.45a
NPS ₇₅₀	5.35±0.01a	0.11±0.01a	21.79±0.31c	1.37±0.01d	163.10±0.28e	10.57±0.33c	208.45±1.31d
NPS ₁₅₀₀	5.36±0.01a	0.12±0.01a	22.47±0.50c	1.40±0.02cd	175.84±0.46d	10.91±0.59c	219.92±3.22c
NPS ₂₂₅₀	5.36±0.02a	0.12±0.02a	24.63±0.78b	1.42±0.01c	178.69±0.80c	11.36±0.31b	229.72±1.71b
NPS ₃₀₀₀	5.37±0.01a	0.13±0.01a	25.14±0.07b	1.46±0.01b	180.89±1.13b	11.70±0.38b	232.31±0.67b
NPO ₁₅₀₀	5.35±0.01a	0.12±0.02a	24.33±0.14b	1.40±0.02cd	174.80±0.08d	10.78±0.28c	217.57±0.43c

的活性,其对农业生产造成的负面影响受到越来越多的关注。王伯仁等^[8]的研究结果表明长期施用化学肥料导致土壤pH值下降,造成了土壤酸化。而董文等^[26]通过开展长期定位试验发现,连续10a施用不同用量污泥与对照相比能提高土壤pH 0.58~0.71个单位,Wan等^[27]的研究同样表明在污染场地施用污泥堆肥能够显著改善土壤养分状况,提高土壤pH,这与本研究结果一致。在本研究中施用污泥堆肥显著提高了土壤pH,这可能是试验施用的污泥堆肥呈碱性且含有大量有机物质,能够提高土壤的酸碱缓冲性能,从而提高土壤pH^[28]。同时由于污泥堆肥的比重一般比土壤小,因此施入土壤后能降低土壤容重,改善土壤的物理性状^[14,29],大量研究已经证明污泥中含有丰富的营养物质,施用污泥能有效提高土壤中有机质含量及各速效养分含量^[10-13]。本研究结果显示,土壤有机质、全氮及各速效氮磷钾含量均随污泥堆肥替代化肥比例的增加而增加,这与徐富锦等^[30]在施用污泥堆肥改善石灰性土壤肥力的研究中得到的结果一致,说明施用污泥堆肥可改善耕层土壤的理化性质,减少矿质元素的淋洗损失,进而提高土壤肥力。相关研究证明土壤酸碱性通过影响矿质盐分的溶解度进而影响养分的有效性,pH作为影响土壤有效磷的重要因素,其影响表现在土壤的固磷作用^[31],本试验中不同比例污泥堆肥的施用显著提高了酸性土壤的pH值,并且有效磷的含量与污泥堆肥的替代比例正相关,这是由于pH影响了土壤中无机磷的存在形态,并且污泥堆肥中大量有机质与土壤黏土矿物相互作用,占据磷的吸附位点,增加磷的移动性,进一步提高磷的有效性。Delibacak等^[32]研究在砂质黏土上增施不同比例污泥产物对作物产量的影响,发现两年内土壤pH和全氮、有效磷、有效钾、有机质含量显著提高。Veiga等^[33]在

葡萄牙中部地区研究了城市污泥堆肥对玉米种植田土壤的长期影响,结果表明与高量施用化肥相比,施用污泥提高了土壤有机质(由1.2%升至2.2%)、总磷(由1 134 mg·kg⁻¹升至2 747 mg·kg⁻¹)和有效磷(由98.44 mg·kg⁻¹升至821.85 mg·kg⁻¹)含量。研究表明污泥堆肥中的有机态氮及磷与低位的碳氮比加速了污泥矿化过程,使污泥中有机物质分解,并形成土壤腐殖物质,让污泥中的养分可以得到稳定持续释放^[30]。并且污泥堆肥的缓释效果使其可以持续为作物提供营养,减少土壤养分的流失,故相比于化肥能够更好地为土壤提供速效养分。Lloret等^[34]研究发现相比于对照,施用高温好氧消化污泥和常温厌氧消化污泥能显著提高土壤有机碳及全量氮、磷含量,并且两种污泥的施用效果均优于同等养分的化肥,但在该研究中,施用污泥对提升土壤中钾素含量并无显著影响。李艳霞等^[35]的研究也有类似结果。但也有研究表明施用污泥能提升土壤氮磷及有机质含量,同时也有利于土壤速效钾含量的提高^[36]。这或许与不同种类的污泥所含养分具有差别有关。因此污泥替代化肥对增加土壤养分的有效性、提高土壤肥力及改善土壤结构具有重要意义^[30]。

3.2 污泥堆肥替代化肥对土壤铬及其有效性的影响

由于生活污水除了有益的植物养分外,同时还含有各种重金属和类金属等有害成分,所以生活污水在土壤上的不合理施用,容易造成耕地重金属的累积,污泥的农业应用仍存在一些潜在的土壤环境污染风险等问题^[15]。本试验为降低生活污水农用风险,将含水率低于40%的生活污泥进行好氧堆肥处理,利用污泥堆肥产物进行不同比例替代化肥效果分析,其中施用污泥堆肥对土壤重金属铬含量及其有效性是本文研究的重点。土壤中重金属的污染风险不仅与其

总量有关,更与重金属的有效态含量及占比密切相关^[37]。同时由于土壤和污泥所处环境的理化性质不同,其中重金属的含量也不同,重金属各形态分布也不一致,因此向农田中施用污泥产物会对土壤中重金属的形态分布产生影响^[26]。铬在土壤中的迁移过程实际上是一个吸附和解吸的物理、化学反应过程。控制铬在土壤和液相中迁移的化学因素主要包括土壤pH值、质地、氧化还原电位、有机质、阳离子交换量等。有研究表明连续多年施用污泥堆肥会显著增加土壤-植物系统中重金属含量,所以污泥产物中的重金属是我国污泥农用的最大障碍^[30]。而在本试验中污泥堆肥施用量在 $750\sim 7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时对土壤总铬含量增幅并不显著,这或许是因为玉米植株不同部位对铬的携出量大于污泥携入土壤中铬的含量(表6)。这说明污泥堆肥的合理施用可以保持土壤铬携入和携出的动态平衡,有利于降低污泥产物土地应用期间的重金属携入危害并保持作物安全生产。相关研究表明污泥好氧堆肥产品施用量在 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,表层土壤重金属铬含量与对照相比无显著差异^[38],同样胡译水等^[39]发现在污泥堆肥产品年施用量为 $3、6、12\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的条件下,重金属铬一般在 $20\sim 40\text{ cm}$ 层积累最多,而对 $0\sim 20\text{ cm}$ 层影响较小。尽管如此,污泥堆肥的长期施用还需要持续监测。重金属铬在土壤中迁移性很小,不能被微生物降解,在土壤中累积并被植物吸收富集后,会通过食物链进入人体,具有潜在危害,并且土壤中有效态铬的含量与植物铬含量显著相关^[40]。本试验结果表明施用污泥堆肥对土壤有效态铬的含量有较好的降低效果。本试验中污泥堆肥替代化肥比例在 $10\%\sim 40\%$ 时,土壤有效态铬含量均较对照显著降低,但当污泥堆肥施用量达到 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,土壤有效态铬含量与其余替代化肥处理相比显著增加,这与大多数研究者认为高量施用污泥会增加农田重金属污染风险的观点一致。相关研究表明土壤中重金属形态及其在土壤中迁移主要受有机质的形态及变化的影响^[40]。其中陶玲等^[41]发现生活污水中腐殖质含量丰富,重金属会被腐殖质吸附或与腐植酸反应形成稳定的复合物,从而使土壤中重金属的活性降低。同样Macedo等^[42]的研究也有类似结果,在连续 11 a 施入不同质量($0、5、10\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $20\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)的污泥后表层土壤的铬、镉、铅的含量和生物有效性均没有显著增加,这或许是因为污泥产物中存在的大量有机质在酸性土壤中可提供电子以促进六价铬还原为三价铬^[43]。同时Fang等^[44]研究了重复添加

污泥堆肥对重金属淋溶行为的影响,结果表明多次添加污泥堆肥虽然会导致土壤重金属总含量的积累,但由于土壤有机质含量的显著提高,微生物活性和耗氧量也增强,从而形成的土壤还原条件使重金属铬的累积释放量仅占总释放量的 5% 。此外前人的研究表明,土壤中有有机结合态铬与有机质含量呈极显著正相关,但与残渣态铬呈极显著负相关,并且生活污水中的有机物在分解过程中生成的部分土壤腐殖物质可以与游离的铬离子络合,从而降低有效态铬的含量^[45],这在王美等^[46]和Lakhdar等^[47]的研究中得到了证明。同样土壤pH升高(>8)导致土壤中重金属沉淀,而土壤pH降低(<7)则导致重金属解吸^[46]。在强酸性土壤中,水溶态和交换态铬的含量增大,土壤中铬向植株迁移的风险也随之提升,并且也存在土壤残渣态铬的含量会随土壤碱性增强而增加的趋势^[47-48]。在本研究中施用生活污水能一定程度上提高土壤pH值,有助于抑制某些可溶性金属有机配合物的形成,从而降低重金属铬的有效性。

3.3 污泥堆肥替代化肥对玉米生长以及铬积累的影响

污泥堆肥中含有大量的有机质和氮磷钾元素,这些恰好是作物生长发育过程中不可或缺的营养元素,并且污泥堆肥替代无机肥料的施用,有利于降低农田氮磷流失,提高土壤有机质,从而改善土壤的生物、化学和物理性质,并增加作物产量^[10-13]。Skowronska等^[49]研究表明高量施用污泥产物能显著增加土壤碳氮含量及酶活性。本研究中,不同替代处理较对照玉米增产效果明显,且在污泥堆肥 40% 替代化肥时对玉米产量增幅效果最好,并且不同污泥堆肥替代化肥处理总体上对玉米生长具有积极影响,同样占婷婷等^[50]发现施用适量的污泥对玉米个体的生长有促进作用,且污泥施用量在 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时效果最好。在本研究中,污泥堆肥施用量在 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时玉米产量虽然相比于对照增产显著,但较常规施肥处理减产 9.62% ,这可能是高量施用生活污水增加了土壤中重金属铬的有效性,导致作物受到铬毒害从而影响作物产量^[26]。Mallick等^[51]发现相比于对照, $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以及 $9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 铬处理下玉米根系的发育受到严重影响,并且相关研究表明铬浓度在 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 或 $300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时玉米产量较对照显著降低^[52]。同时由于污泥堆肥中的氮磷等养分释放速度较慢,较高比例的污泥堆肥导致了土壤中有效氮的含量不足,仅单施污泥堆肥无法满足农作物前期生长需求造成玉米减产^[53-54]。因此,需进一步研究污泥堆肥对作物产量影响的关键因

素及其机理。在本试验中,无机有机配施处理下玉米籽粒中铬含量均在《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)中的国家标准限量值 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下。其中籽粒铬含量最低的是NPS₂₂₅₀处理,仅为 $0.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明施用污泥堆肥有利于削弱铬从土壤向植株的转移,这与前人研究结果类似^[52]。这可能是因为污泥施用进土壤后,有效态铬会与之络合或螯合转化为沉淀态从而固定。其次,这与植物对铬的富集主要在根部有关,Adiloglu等^[55]的研究结果表明植物吸收的重金属大部分滞留在根部,少部分随植物体内原生质流动至相邻细胞,并输送到导管中,随后通过蒸腾作用向作物地上部逐渐迁移,最终累积在不同器官,如秸秆、籽粒等。同时Chen等^[56]的研究也证实玉米对铬的积累主要在根部,有小部分富集在秸秆中。本研究也有类似结果,同处理玉米不同部位中铬含量均存在根系>秸秆>穗轴>籽粒的快速递减规律,而且不同部位之间还存在极显著差异,玉米根系对铬的吸收富集能力显著高于其他器官。其中对照玉米不同部位的铬含量均为最高,其余处理对玉米植株中的铬含量均有不同程度的降低效果。并且在铬污染土壤施入大量的生活污水,会增加玉米根系对铬的吸收,在本试验中S₇₅₀₀处理下玉米根系铬积累量相比于其余配施处理增加最明显,与NPS₂₂₅₀处理相比增加16.52%。这与土壤施入生活污水增加土壤有机碳的含量,利于土壤中大团聚体的形成,提升土壤有效态铬的含量,从而增加玉米根系富集铬有关^[57]。本试验中,污泥和化肥的配合施用大幅度降低了玉米籽粒铬的积累,使得生活污水在铬污染耕地上的安全利用得到了保证,但随着污泥用量的大幅度增加,玉米富集重金属的可能性也提高。由于生活污水与处理技术或产生的组成成分相关,因此其重金属浓度可能有所不同,且重金属具有累积性污染,为更加全面了解污泥堆肥改良铬污染土壤的可行性,今后还需对污泥种类以及施用年限进行监测以确保得到更准确的评价结果。

4 结论

(1)施用污泥堆肥产品条件下,玉米各部位生物量均得到较好的提升,其中污泥堆肥替代30%化肥相较于对照对玉米产量提高最高,达到了36.65%。

(2)污泥堆肥部分替代化肥能够有效降低玉米籽粒铬含量,相比于对照,降低幅度在24.18%~45.07%,且均在《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB

2762—2022)规定的限量值以下,其中污泥堆肥替代30%化肥时玉米籽粒铬含量最低,为 $0.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(3)施用不同量的污泥堆肥对土壤总铬含量影响不显著,并且与化肥配施有利于降低土壤有效态铬的含量,其中污泥堆肥替代30%化肥时,土壤有效态铬含量显著低于其余处理。

(4)相较于对照,污泥堆肥替代化肥比例在20%时,即能保障玉米安全、高产,并且不会对土壤造成富集铬的风险。

(5)污泥堆肥替代处理对玉米生长不产生盐害,且有助于减缓玉米收获后农田土壤酸化,并随着替代比例升高,玉米收获后土壤养分含量均呈现上升趋势。

参考文献:

- [1] 王兴润,李磊,颜湘华,等. 铬污染场地修复技术进展[J]. 环境工程, 2020, 38(6): 1-8, 23. WANG X R, LI L, YAN X H, et al. Progress in remediation of chromium-contaminated sites[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(6): 1-8, 23.
- [2] WANG Y, FANG Z, LIANG B, et al. Remediation of hexavalent chromium contaminated soil by stabilized nanoscale zero-valent iron prepared from steel pickling waste liquors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 247(6): 283-290.
- [3] HOU D Y, O'CONNOR D, IGALAVITHANA A D, et al. Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(7): 366-381.
- [4] 陈文轩,李茜,王珍,等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2822-2833. CHEN W X, LI Q, WANG Z, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6): 2822-2833.
- [5] ZHANG L X, ZHU G Y, GE X, et al. Novel insights into heavy metal pollution of farmland based on reactive heavy metals (RHMs): pollution characteristics, predictive models, and quantitative source apportionment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 360: 32-42.
- [6] ASHRAF A, BIBI I, NIAZI N K, et al. Chromium (VI) sorption efficiency of acid-activated banana peel over organo-montmorillonite in aqueous solutions[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2017, 19(7): 605-613.
- [7] DUAN Y H, XU M G, GAO S D, et al. Long-term incorporation of manure with chemical fertilizers reduced total nitrogen loss in rain-fed cropping systems[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33611.
- [8] 王伯仁,蔡泽江,李冬初. 长期不同施肥对红壤旱地肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 85-88. WANG B R, CAI Z J, LI D C. Effect of different long-term fertilization on the fertility of red upland soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 85-88.
- [9] NORMAN U, FRANK B. Making rice production more environmental-

- ly-friendly[J]. *Environments*, 2016, 3(12):1-7.
- [10] SOUMARE M, TACK F, VERLOO M. Characterisation of Malian and Belgian solid waste composts with respect to fertility and suitability for land application[J]. *Waste Management*, 2003, 23(6):517-522.
- [11] HALECKI W, GASIOREK M, GAMBUS F, et al. The potential of hydrated and dehydrated sewage sludge discharges from soil reclamation appliances[J]. *Ecology Environment & Conservation*, 2016, 25(6):1935-1941.
- [12] SELEIMAN M, SANTANEN A, MAKELA P. Recycling sludge on cropland as fertilizer—advantages and risks[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2020, 155:104647.
- [13] ANTONIADIS V. Sewage sludge application and soil properties effects on short-term zinc leaching in soil columns[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2008, 190(1/2/3/4):35-43.
- [14] OJEDA G, ALCAÑIZ J M, LE Y. Differences in aggregate stability due to various sewage sludge treatments on a Mediterranean calcareous soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 125(1):48-56.
- [15] 杨鹏, 刘家华, 李茹莹, 等. 预处理污泥对Cr在玉米和土壤中迁移转移影响[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(5):109-115. YANG P, LIU J H, LI R Y, et al. Effect of ozone-electric treatment on the enrichment and transfer of heavy metal chromium in sludge[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(5):109-115.
- [16] 马利民, 陈玲, 吕彦, 等. 污泥土地利用对土壤中重金属形态的影响[J]. *生态环境学报*, 2004, 3(2):151-153. MA L M, CHEN L, LÜ Y, et al. Effects of sewage sludge application to land on species of heavy metals in soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2004, 3(2):151-153.
- [17] 李淑芹, 田仲鹤, 金宏鑫, 等. 施用城市污泥堆肥对土壤和大豆器官重金属积累的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(2):352-357. LI S Q, TIAN Z H, JIN H X, et al. Effects of municipal sludge composts on heavy metal accumulation in soil and soybean[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(2):352-357.
- [18] MADRID F, FLORIDO M C. Effects of the presence of a composted biosolid on the metal immobilizing action of anurban soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 176:792-798.
- [19] TAGHIPOUR M, JALALI M. Influence of organic acids on kinetic release of chromium in soil contaminated with leather factory waste in the presence of some adsorbents[J]. *Chemosphere*, 2016, 155:395-404.
- [20] DING W X, STEWART D I, HUMPHREYS P N, et al. Role of an organic carbon-rich soil and Fe(III) reduction in reducing the toxicity and environmental mobility of chromium(VI) at a COPR disposal site[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 541:1191-1199.
- [21] HSU N H, WANG S L, LIAO Y H, et al. Removal of hexavalent chromium from acidic aqueous solutions using rice straw-derived carbon[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1/2/3):1066-1070.
- [22] ALYAZOURI A, JEWSBURY R, TAYIM, H, et al. Uptake of chromium by portulaca oleracea from soil: effects of organic content, pH, and sulphate concentration[J]. *Applied and Environmental Soil Science*, 2020, 2020:1-10.
- [23] YU H X, XIAO H Y, CUI Y L, et al. High nitrogen addition after the application of sewage sludge compost decreased the bioavailability of heavy metals in soil[J]. *Environmental Research*, 2022, 215(P1):114351.
- [24] 徐森彪, 赵苏云. 电感耦合等离子体质谱法测定土壤中的有效态铬[J]. *上海计量测试*, 2021, 48(2):14-17. XU S B, ZHAO S Y. Determination of available chromium in soil by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2021, 48(2):14-17.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997:25-151. BAO S D. Analysis of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1997:25-151.
- [26] 董文, 张青, 王煌平, 等. 长期施用污泥对土壤-萝卜系统重金属积累及土壤养分含量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(4):647-654. DONG W, ZHANG Q, WANG H P, et al. Effects of the long-term application of sludge on heavy metal accumulation and soil nutrient content in soil radish system[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(4):647-654.
- [27] WAN X M, ZENG W B, LEI M, et al. The influence of diverse fertilizer regimes on the phytoremediation potential of *Pteris vittata* in an abandoned nonferrous metallic mining site[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 880:163246.
- [28] 吴霄霄, 曹榕彬, 米长虹, 等. 重金属污染农田原位钝化修复材料研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(3):253-263. WU X X, CAO R B, MI C H, et al. Research progress of in-situ passivated remedial materials for heavy metal contaminated soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3):253-263.
- [29] SONG U, LEE E J. Environmental and economical assessment of sewage sludge compost application on soil and plants in a landfill[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54:1109-1116.
- [30] 徐富锦, 常会庆, 潘亚杰, 等. 连续施用堆肥污泥提高小麦-玉米轮作下酸性水稻土肥力[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(3):71-77. XU F J, CHANG H Q, PAN Y J, et al. Improving acid paddy soil fertility by continuous sludge application under wheat-maize rotation[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science)*, 2022, 43(3):71-77.
- [31] 李佳琪, 孙凤霞, 孙楠, 等. 黑土累积磷的释放动力学特征及主要影响因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(2):253-263. LI J Q, SUN F X, SUN N, et al. Release kinetics characteristics and the main drivers of phosphorous accumulated in black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(2):253-263.
- [32] DELIBACAK S, ONGUN A R. Influence of treated sewage sludge applications on corn and succeeding wheat yield and on some properties of sandy clay soil[J]. *Turkish Journal of Field Crops*, 2016, 24(1):1-9.
- [33] VEIGA A, FERREIRA C, PINTO L, et al. Long term impact of sludge application in maize farm[J]. *Proceedings*, 2019, 30(1):74.
- [34] LLORET E, PASCUAL J A, BRODIE E L, et al. Sewage sludge addition modifies soil microbial communities and plant performance depending on the sludge stabilization process[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 101:37-46.

- [35] 李艳霞, 陈同斌, 罗维, 等. 中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用[J]. 生态学报, 2003, 23(11):2464-2474. LI Y X, CHEN T B, LUO W, et al. Contents of organic matter and major nutrients and the ecological effect related to land application of sewage sludge in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11):2464-2474.
- [36] MUNN K J, EVANS J, CHALK P M. Mineralization of soil and legume nitrogen in soils treated with metal-contaminated sewage sludge[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32:2031-2043.
- [37] 姚澄, 周天宇, 易超, 等. 施用锰肥对根际土壤锰有效性及小麦镉吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9):1955-1965. YAO C, ZHOU T Y, YI C, et al. Effects of manganese fertilizer on rhizosphere soil manganese availability and cadmium uptake and transport by wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(9):1955-1965.
- [38] 董晓芸, 柯凯恩, 胡自航, 等. 施用不同污泥堆肥对土壤理化性质及微生物活性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(6):70-75. DONG X Y, KE K E, HU Z H, et al. Effect of different sludge composting on soil physical and chemical properties and microbial activity[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(6):70-75.
- [39] 胡译水, 齐实, 李昱彤, 等. 污泥堆肥施用对土壤及地下水影响研究[J]. 中国环境科学, 2020, 40(5):2157-2166. HU Y S, QI S L, LI Y T, et al. Effects of sludge composting products on soil and groundwater[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(5):2157-2166.
- [40] ZHU Y C, JIN Y, LIU X S, et al. Insight into interactions of heavy metals with livestock manure compost-derived dissolved organic matter using EEM-PARAFAC and 2D-FTIR-COS analyses[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 420:126532.
- [41] 陶玲, 张倩, 张雪彬, 等. 凹凸棒石-污泥共热解生物炭对玉米苗期生长特性和重金属富集效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7):1512-1520. TAO L, ZHANG Q, ZHANG X B, et al. Influence of biochar prepared by co-pyrolysis with attapulgite and sludge on maize growth and heavy metal accumulation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7):1512-1520.
- [42] MACEDO F, JOSÉ DE MELO W, MERLINO L, et al. Accumulation and availability chromium, cadmium and lead in soils treated with sewage sludge for eleven consecutive years[J]. *Revista Cultural e Científica da Universidade Estadual de Londrina*, 2012, 33(1):101-113.
- [43] LEE D Y, SHIH Y N, ZHENG H C, et al. Using the selective ion exchange resin extraction and XANES methods to evaluate the effect of compost amendments on soil chromium (VI) phytotoxicity[J]. *Plant and Soil*, 2006, 281(1/2):87-96.
- [44] FANG W, DELAPP R C, KOSSON D S, et al. Release of heavy metals during long-term land application of sewage sludge compost: Percolation leaching tests with repeated additions of compost[J]. *Chemosphere*, 2017, 169:271-280.
- [45] CLEMENTE R, PAREDES C, BERNAL M P. A field experiment investigating the effects of olive husk and cow manure on heavy metal availability in a contaminated calcareous soil from Murcia (Spain)[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006, 118(1/2/3/4):319-326.
- [46] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤和作物重金属累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1):63-74. WANG M, LI S T, MA Y B, et al. Effect of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1):63-74.
- [47] LAKHDAR A, BEN ACHIBA W, MONTEMURRO F, et al. Effect of municipal solid waste compost and farmyard manure application on heavy-metal uptake in wheat[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2009, 40(21/22):3524-3538.
- [48] KOLELI N. Speciation of chromium in 12 agricultural soils from Turkey[J]. *Chemosphere*, 2014, 57(10):1473-1478.
- [49] SKOWRONSKA M, BIELINSKA E J, SZYMANSKI K. An integrated assessment of the long-term impact of municipal sewage sludge on the chemical and biological properties of soil[J]. *Catena*, 2020, 189:104484.
- [50] 占婷婷, 李渊, 石辉, 等. 市政污泥直接施用对玉米生长和品质的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5):172-178. ZHAN T T, LI Y, SHI H, et al. Effects of direct application of municipal sludge on growth and quality of *Zea mays*[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(5):172-178.
- [51] MALLICK S, SINAM G, MISHRA R K, et al. Interactive effects of Cr and Fe treatments on plants growth, nutrition and oxidative status in *Zea mays* L. [J]. *Ecotoxicology and Environmental safety*, 2010, 73(5):987-995.
- [52] GOLOVATYJ S E, BOGATYREVA E. Effect of levels of chromium content in a soil on its distribution in organs of corn plants[J]. *Soil Research And Use of Fertilizers*, 1999:197-204.
- [53] NAHAR N, HOSSEN, M S. Influence of sewage sludge application on soil properties, carrot growth and heavy metal uptake[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2021, 52(1):1-10.
- [54] FERNANDES A S, AZEVEDO T, ROCHA F, et al. Uptake and translocation of synthetic musk fragrances by pea plant grown in sewage sludge-amended soils[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 310:119908.
- [55] ADILOGLU S, GOKER M. Phytoremediation: elimination of hexavalent chromium heavy metal using corn (*Zea mays* L.) [J]. *Cereal Research Communications*, 2020, 49(1):65-72.
- [56] CHEN X H, SUN H X, ZHANG T Y, et al. Effects of pyridinium-based ionic liquids with different alkyl chain lengths on the growth of maize seedlings[J]. *Journal of hazardous materials*, 2021, 427.
- [57] NASCIMENTO A L, PAIVA A D, SOUZA L S, et al. Heavy metals distribution in different parts of cultivated and native plants and their relationship with soil content[J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2020, 18:225-240.