

施用城镇生活污水对小麦产量和品质及安全性的影响

武升¹, 张俊森¹, 张杰瑜^{2*}, 王强¹, 张震¹, 李国亮^{3, 4}, 康婷婷^{3, 4}, 马友华¹

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2. 六安职业技术学院, 安徽 六安 237158; 3. 蚌埠圻润环境工程科技有限公司, 安徽 蚌埠 233000; 4. 蚌埠市污泥处理处置及资源化利用工程技术研究中心, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 针对城镇生活污水施入农田的潜在污染风险问题, 通过田间试验, 开展了城镇生活污水在小麦上的施用效果研究, 探讨了施用城镇生活污水对小麦产量和品质及安全性的影响, 以期城镇生活污水农业上资源化利用提供依据。研究表明: 施用城镇生活污水有助于提高小麦产量。单施生活污水 (T2、T3) 较空白不施肥 (CK) 处理小麦增产 83.85% ~ 139.04%, 一定范围内, 小麦产量随着生活污水用量的增加而增大。在生活污水 2250 kg/hm² 配合复合肥 450 kg/hm² (T6) 处理更有助于小麦产量增加, 合理配施城镇生活污水有助于有机养分替代及化肥减量。施用城镇生活污水有利于提升小麦籽粒品质。与空白不施肥 (CK) 处理相比, 施用生活污水显著提高了小麦籽粒干面筋、湿面筋及淀粉含量, 单施生活污水 6000 kg/hm² (T3) 处理的小麦籽粒干面筋、湿面筋和淀粉含量分别提高了 19.7%、15.2% 和 7.83%。部分化肥配施生活污水 (T4、T9) 处理小麦籽粒中 Cr 含量超过国家限量标准 (1 mg/kg)。随着生活污水施用量的增加, 小麦籽粒重金属富集的风险增高, 但不同元素增幅存在差异。施用城镇生活污水, 小麦籽粒中多环芳烃类、酞酸酯类有机污染物含量符合食品安全国家标准。城镇生活污水农用时, 建议单独施用生活污水用量 6000 kg/hm²; 生活污水与化肥进行配施的情况下, 用量为生活污水 2250 kg/hm² + 复合肥 (15-15-15) 450 kg/hm²。

关键词: 生活污水; 小麦; 产量; 品质; 重金属; 有机污染物

城镇生活污水是城镇污水处理后的废弃物。随着我国城镇生活水平的不断提高, 城镇生活污水大量产生, 对生态环境造成潜在污染风险, 亟需无害化处置和资源化利用^[1]。目前, 国际上对城镇生活污水的处置以填埋、填海、焚烧和农田利用 4 种方式为主^[2]。城镇生活污水中含有各种养分, 这让城镇生活污水堆肥资源化利用成为了可能^[3-4]。英国、法国和荷兰等国城镇生活污水土地利用率达到 50% 以上^[5-6]。有研究表明^[7], 污泥堆肥中具有丰富的有机质, 施入土壤经微生物等分解后, 可以转化生成大量的腐殖酸和激素等物质。施用适量生活污水堆肥能够有效改善土壤理化性状, 有利于作物生长与产量的提升^[8-9]。然而, 城镇生活污水中还存在重金属、有机污染物等有毒有害物质^[10], 进入土壤环境后易被植物吸收

富集^[11-12]。研究表明^[13-14], 施用污泥会增加植物及土壤重金属积累, 且重金属含量随施用量呈不断上升趋势。不合理施用会对土壤环境和农作物品质及安全性造成不利影响, 但目前关于施用城镇生活污水对作物品质及安全性的影响却鲜有报道^[15-16]。本研究基于城镇生活污水配施不同肥料类型及用量的大田试验, 开展城镇生活污水在小麦上的施用效果研究, 探讨施用城镇生活污水对小麦产量、品质、重金属及有机污染物含量的影响, 旨在为城镇生活污水农用的安全性及推广应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点选择在安徽省蚌埠市龙子湖区。供试土壤类型为潮土, 基本理化指标为: pH 值 6.3, 有机质 20.05 g/kg, 全氮 0.91 g/kg, 有效磷 35.58 mg/kg, 速效钾 50 mg/kg, 总汞 0.238 mg/kg, 总砷 6.1 mg/kg, 总镉 0.11 mg/kg, 总铅 47.2 mg/kg, 总铬 40.4 mg/kg。

收稿日期: 2020-03-24; 录用日期: 2020-04-18

作者简介: 武升 (1991-), 男, 安徽萧县人, 助理研究员, 硕士, 主要从事农业资源与环境领域研究。E-mail: 1916684369@qq.com。

通讯作者: 张杰瑜, E-mail: 780038719@qq.com。

1.2 试验材料

供试小麦品种为洛麦 23, 于 2016 年 11 月 27 日种植, 2017 年 5 月 30 日收获。田间管理按小麦优质栽培管理措施进行。城镇生活污水来源于蚌埠市第二污水处理厂处理的城镇生活污水, 经蚌埠圻润环境工程科技有限公司再处理, 各指标含量符合《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284-2018), 可进行农田土地利用, 具体指标含量见表 1; 商品有

机肥中有机质含量大于 45%, 氮、磷、钾的含量分别为 N 2.41%, P₂O₅ 1.71%, K₂O 1.61%; 供试当地上一季水稻秸秆, 各养分含量为: 全氮 0.77%, 全磷 0.13%, 全钾 1.80%。

1.3 试验设计

根据肥料类型与施肥量的不同, 试验设 10 个处理, 每处理重复 3 次, 小区面积为 20 m² (4 m × 5 m), 共 30 个小区, 试验各处理类型如表 2 所示。

表 1 供试生活污水与《农用污泥污染物控制标准》指标比较

类型	pH 值	有机质 (%)	全氮 (%)	全磷 (%)	全钾 (%)	总汞 (mg/kg)	总砷 (mg/kg)	总镉 (mg/kg)	总铅 (mg/kg)	总铬 (mg/kg)	多环芳烃 (mg/kg)	苯并(a)芘 (mg/kg)
供试生活污水	6.9	33.8	3.88	0.61	0.73	1.50	24.1	1.28	0.5	66	<5	<2
《农用污泥污 染物控制标准》 (GB 4284-2018)	5.5 ~ 8.5	≥ 20				<3	<30	<3	<300	<500	<5	<2

表 2 试验处理类型及氮磷钾用量

(kg/hm²)

处理	处理类型	氮磷钾用量		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	空白, 不施肥	0	0	0
T1	常规施肥, 复合肥 (15-15-15) 600+ 尿素 112.5	141.8	90.0	90.0
T2	单用生活污水, 污泥 3000	166.4	18.3	21.9
T3	单用生活污水, 污泥 6000	232.8	36.6	43.8
T4	生活污水 750+ 复合肥 (15-15-15) 600	119.1	94.6	95.5
T5	生活污水 1500+ 复合肥 (15-15-15) 525	137.0	87.9	89.7
T6	生活污水 2250+ 复合肥 (15-15-15) 450	154.8	81.2	83.9
T7	商品有机肥 1500+ 复合肥 (15-15-15) 525	114.9	104.4	102.9
T8	复合肥 (15-15-15) 525+ 水稻秸秆 (干基) 6000	125.0	86.6	186.8
T9	生活污水 750+ 复合肥 (15-15-15) 450+ 水稻秸秆 (干基) 6000	142.8	79.9	181.0

1.4 样品检测

土样和水稻秸秆及城镇生活污水中的常规指标测定参照鲍士旦编著的《土壤农化分析》^[17]。重金属测定采用 4 种酸 (HNO₃、HF、HClO₄、HCl) 电热板消解 AAS 法^[18]。小麦籽粒中湿面筋测定采用仪器法 (GB/T 5506.2-2008); 淀粉测定采用酸水解法 (GB 5009.9); 蛋白质测定采用凯氏定氮法 (GB 5009.5); 多环芳烃类有机污染物测定采用高效液相色谱法 (GB 5009.265-2016); 酞酸酯类有机污染物测定采用气相色谱-质谱法 (GB 5009.271)。

1.5 数据分析

利用 Excel 2019 和 Origin 8.0 软件对数据整理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同生活污水用量对小麦产量的影响

图 1 为不同生活污水用量对小麦产量的影响。由图 1 可知, 与空白不施肥 (CK) 处理相比, 施用生活污水及与化肥或商品有机肥等配施处理的小麦增产 83.85% ~ 144.59%。单施生活污水 (T2、T3) 较空白不施肥 (CK) 处理小麦增产

83.85% ~ 139.04%，单施生活污水 6000 kg/hm² (T3) 相对于单施生活污水 3000 kg/hm² (T2) 处理显著提高了小麦产量，说明施用生活污水有助于提高小麦产量。

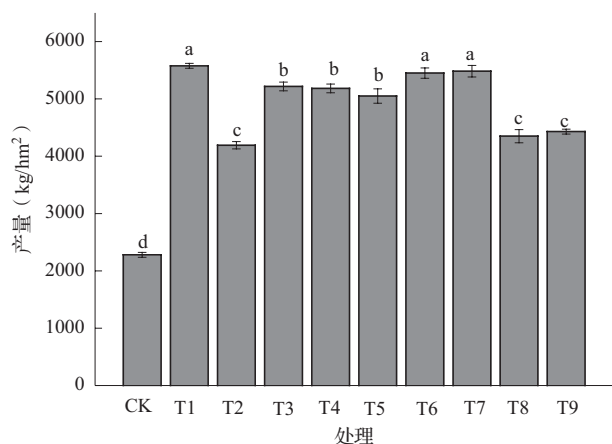


图1 不同生活污水用量对小麦产量的影响

注：不同小写字母表示差异达显著水平。

生活污水与复合肥配施的结果显示，在施用生活污水 2250 kg/hm² + 复合肥 450 kg/hm² (T6) 的条件下，小麦产量显著高于施用生活污水 750 kg/hm² + 复合肥 600 kg/hm² (T4) 及施用生活污水 1500 kg/hm² + 复合肥 525 kg/hm² (T5) 处理。本研究结果与李海英等^[19] 在施用不同配比用量的污泥复混肥后有助于小麦增量的结论一致。相同复合肥施用量条件下，施用生活污水 1500 kg/hm² (T5) 的小麦产量高于施用水稻秸秆 6000 kg/hm² (T8) 处理；施用生活污水 2250 kg/hm² (T6) 的小麦产量高于生活污水 750 kg/hm² + 水稻秸秆 6000 kg/hm² (T9) 处理。总体来看，施用生活污水有助于小麦产量的提高。在一定施用量内，随着生活污水用量的增大，小麦产量也有所增加，这与陈同斌等^[20] 的研究结果一致。

2.2 不同生活污水用量对小麦品质的影响

图2、3分别为不同生活污水用量对小麦籽粒干面筋、湿面筋、蛋白质及淀粉含量变化的影响。由图2、3可知，与空白不施肥 (CK) 处理相比，施用生活污水提高了小麦籽粒干面筋、湿面筋和淀粉含量，单施生活污水 6000 kg/hm² (T3) 处理的小麦籽粒干面筋、湿面筋和淀粉含量分别提高了19.7%、15.2% 和 7.83%。随着生活污水施用量的增加，单施生活污水 6000 kg/hm² (T3) 的小麦籽粒干面筋及湿面筋含量显著高于单施生活污水 3000 kg/

hm² (T2) 处理。生活污水 2250 kg/hm² + 复合肥 450 kg/hm² (T6) 配施条件下，小麦籽粒淀粉含量比空白不施肥 (CK) 处理提高了23.94%，且小麦籽粒淀粉含量显著高于施用生活污水 750 kg/hm² + 复合肥 600 kg/hm² (T4) 及施用生活污水 1500 kg/hm² + 复合肥 525 kg/hm² (T5) 处理。在生活污水施用 750 kg/hm² + 复合肥 600 kg/hm² (T4) 的配施条件下，小麦籽粒湿面筋、干面筋、淀粉的含量高于施用配施尿素 112.5 kg/hm² (T1) 处理，蛋白质含量略有下降。复合肥与生活污水及商品有机肥等配施条件下，配施生活污水的小麦籽粒湿面筋、干面筋和淀粉含量相对更高。

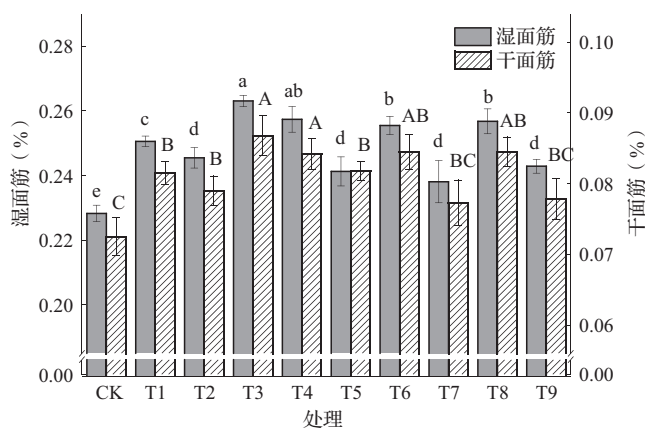


图2 不同生活污水用量对小麦籽粒干面筋和湿面筋含量的影响

注：不同大、小写字母分别表示差异达0.01、0.05显著水平。下同。

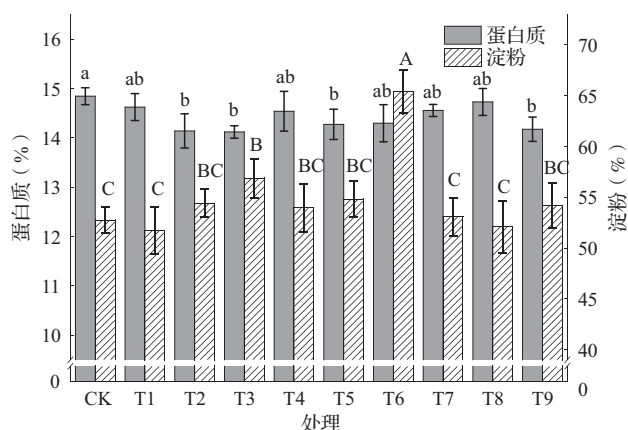


图3 不同生活污水用量对小麦籽粒蛋白质和淀粉含量的影响

2.3 不同生活污水用量对小麦籽粒重金属含量的影响

表3为不同生活污水用量对小麦籽粒重金属含量的影响，参照《食品中污染物限量》GB 2762-

表 3 不同施肥处理对小麦籽粒中重金属含量的影响

处理	(mg/kg)				
	Cr	Pb	Cd	As	Hg
CK	0.55	0.13	0.021	0.03	0.002
T1	0.41	0.08	0.021	0.02	0.002
T2	0.43	0.07	0.019	0.03	0.002
T3	0.71	0.10	0.022	0.03	0.002
T4	1.33	0.11	0.019	0.03	0.003
T5	0.55	0.13	0.025	0.05	0.002
T6	0.45	0.10	0.020	0.06	0.001
T7	0.68	0.12	0.021	0.03	0.002
T8	1.03	0.10	0.023	0.06	0.002
T9	1.14	0.16	0.022	0.07	0.002
《食品中污染物限量》 (GB 2762-2017)	1.0	0.2	0.1	0.5	0.02

2017 可知,各处理小麦籽粒 Pb、Cd、As、Hg 的含量均未超过国家限量标准。与单施生活污水 3000 kg/hm² (T2) 处理相比,施用生活污水 6000 kg/hm² (T3) 的小麦籽粒 Cr、Pb、Cd 含量更高。相同复合肥施用水平下,施用生活污水 1500 kg/hm²+ 复合肥 525 kg/hm² (T5) 处理较施用复合肥 525 kg/hm²+ 水稻秸秆 6000 kg/hm² (T8) 和商品有机肥 1500 kg/hm²+ 复合肥 525 kg/hm² (T7) 处理的小麦籽粒 Pb、Cd 含量最高。施用生活污水 750 kg/hm²+ 复合肥 600 kg/hm² (T4) 的小麦籽粒中 Cr、Pb、As、Hg 含量高于复合肥 600 kg/hm²+ 尿素 112.5 kg/hm² (T1)

处理。本试验表明:随着生活污水施用量的增大,小麦籽粒重金属含量呈增加趋势。

施用生活污水 750 kg/hm²+ 复合肥 600 kg/hm² (T4)、复合肥 525 kg/hm²+ 水稻秸秆 6000 kg/hm² (T8) 及生活污水 750 kg/hm²+ 复合肥 450 kg/hm²+ 水稻秸秆 6000 kg/hm² (T9) 处理中,小麦籽粒 Cr 含量超过国家限量标准 (1 mg/kg)。施用生活污水堆肥会增加作物重金属积累,但不同元素增幅存在差异^[21]。也有文献报道施入污泥后,小麦、玉米等农作物籽粒中重金属含量并未显著增加^[22-23],这可能与施用的生活污水类型及作物品种有关。施用生活污水对小麦籽粒重金属积累带来不同程度的风险,随着用量的增加,小麦富集重金属的可能性越高。由于重金属具有累积性污染,生活污水堆肥农用时,应在加强监管的前提下,严格控制施用量,合理用于当地农业生产,避免造成食品安全问题。

2.4 不同生活污水用量对小麦籽粒有机污染物含量的影响

表 4、5 分别为不同生活污水用量对小麦籽粒中多环芳烃类、酞酸酯类有机污染物含量的影响。由表 4、5 可知,小麦籽粒中多环芳烃类、酞酸酯类有机物的含量均低于检出限,符合食品安全国家标准。Jones 等^[24] 研究报道:施用污泥,小麦籽粒及牧草中有机污染物含量增加,连续施用会提高污染风险。申荣艳等^[25] 研究发现:污泥的施用会不同程度增加植株及土壤中多氯联苯和多环芳经等有机污染物的含量。马晶晶^[26] 同样报道了污泥中有机污染物对作物具有污染风险。但 Waqas

表 4 不同生活污水用量对小麦籽粒中多环芳烃类有机污染物含量的影响

处理	(mg/kg)									
	萘	苊烯	苊	芴	菲	蒽	荧蒽	芘	苯并 (a) 蒽	苯并 (b) 荧蒽
检出限	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
CK	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
T1	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
T2	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
T3	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
T4	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
T5	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
T6	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
T7	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
T8	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
T9	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10

表 5 不同生活污水用量对小麦籽粒中酞酸酯类有机污染物含量影响 (mg/kg)

处理	邻苯二甲酸二甲酯	邻苯二甲酸二乙酯	邻苯二甲酸二丁酯	邻苯二甲酸丁苯酯	邻苯二甲酸二正辛酯
检出限	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
CK	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
T1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
T2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
T3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
T4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
T5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
T6	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
T7	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
T8	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
T9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

等^[27]研究表明:在多环芳烃类有机物污染的土壤中增施 2% ~ 10% 热干化污泥,可有效降低黄瓜对多环芳烃类有机污染物的富集。余杰等^[28]分析了国内外城市污泥中有机污染物现状,针对我国环境现状提出城市污泥中常见的多环芳烃及壬基苯酚类等有机污染物,应作为典型的有机污染物加强研究。

3 讨论与结论

3.1 讨论

施用生活污水有助于提高小麦产量,主要原因是生活污水含有大量养分,有助于作物的生长发育及生物量积累,这与前人研究结果一致^[29-30]。本研究发现:生活污水 2250 kg/hm²+ 复合肥 (15-15-15) 450 kg/hm² (T6) 处理,更有助于增加小麦产量。生活污水与传统化肥及有机肥的合理配施是今后生活污水资源化利用的方向之一,降低生活污水造成环境风险的同时,也利于农田有机养分替代及化肥减量。施用生活污水对小麦不同品质指标提升效果不同。单施生活污水 6000 kg/hm² (T3) 处理相对空白不施肥 (CK) 处理的小麦籽粒干面筋、湿面筋和淀粉含量分别提高了 19.7%、15.2% 和 7.83%;生活污水 2250 kg/hm²+ 复合肥 450 kg/hm² (T6) 配施条件下,小麦籽粒淀粉含量比空白不施肥 (CK) 处理提高了 23.94%。今后可针对不同作物品质提升要求,开展施用生活污水与传统化肥及有机肥的合理配施试验,研究最适宜的施肥方案。本试验表明:与单施污泥 3000 kg/hm² (T2) 处理相比,施用污泥 6000 kg/hm² (T3) 的小麦籽粒 Cr、Pb、Cd 含量

更高,随着生活污水施用量的增大,小麦籽粒重金属含量呈增加趋势,这与戴亮等^[31]的研究结论一致。但不同元素增幅存在差异,施用生活污水 750 kg/hm²+ 复合肥 600 kg/hm² (T4)、复合肥 525 kg/hm²+ 水稻秸秆 6000 kg/hm² (T8) 及生活污水 750 kg/hm²+ 复合肥 450 kg/hm²+ 水稻秸秆 6000 kg/hm² (T9) 处理中,小麦籽粒 Cr 含量均超过国家限量标准 (1 mg/kg),这可能是因为施用化肥会引起土壤酸化,土壤中有效态重金属含量提高,进而被小麦吸收富集;施用生活污水一定程度上可以提高土壤 pH 值,有助于抑制某些可溶性金属有机配合物的形成^[32];生活污水中的有机质在分解过程中可生成不溶性盐,从而降低重金属 Cr 的有效性^[33],这与国内王美等^[21]及国外 Lakhdar 等^[34]研究结论类似。生活污水农用时,因重金属具有累积性污染特性,在推广上需延长试验年限,连续监测施用污泥后对农产品质量安全的影响。综上分析,建议在生活污水安全利用的前提下,单独施用生活污水 6000 kg/hm² 水平及生活污水 2250 kg/hm²+ 复合肥 (15-15-15) 450 kg/hm² 配施用量,有助于小麦产量及品质的提升。

目前,对于生活污水产生的有机污染物风险控制方面的报道较少,有机污染物在土壤和作物中的累积和富集是一个缓慢持续的过程,仍需要进行长期大田定位试验,加强典型有机污染物的监测。不同作物种类和不同类型有机污染物吸收和转运的机理,以及与土壤中有机污染物浓度的关系,还有待进一步研究。生活污水施用对农田微塑料污染问题^[35],也还未在相应法律法规中对其排放标准作

出界定。新形势下,应针对我国生活污水处理处置的现状、技术和发展趋势,加大对污泥减量化、资源化、无害化以及产业链协同创新等新技术、政策与实践的研究。加快对生活污泥处理处置方面的政策、建设、运行等相关标准的制定,推动生活污水资源化利用。

3.2 结论

施用城镇生活污水有助于提高小麦产量。单施生活污水(T₂、T₃)较空白不施肥(CK)处理小麦增产83.85%~139.04%,与单施生活污水3000 kg/hm²(T₂)处理相比,单施生活污水6000 kg/hm²(T₃)显著提高了小麦产量。在一定范围内,小麦产量随着污泥用量的增大而增加。

施用城镇生活污水有利于提升小麦籽粒品质。与空白不施肥(CK)处理相比,单施生活污水6000 kg/hm²(T₃)处理的小麦籽粒干面筋、湿面筋和淀粉含量分别提高了19.7%、15.2%和7.83%。单施生活污水6000 kg/hm²(T₃)的小麦籽粒干面筋及湿面筋的含量显著高于单施生活污水3000 kg/hm²(T₂)处理。

单施生活污水6000 kg/hm²(T₃)的小麦籽粒Cr、Pb、Cd含量比单施生活污水3000 kg/hm²(T₂)处理高。部分施用生活污水与复合肥配施(T₄、T₈、T₉)处理的小麦籽粒中Cr含量超过国家限量标准(1 mg/kg)。施用城镇生活污水的小麦籽粒中多环芳烃类、酞酸酯类有机污染物含量符合食品安全国家标准。

建议单独施用生活污水在6000 kg/hm²水平或生活污水2250 kg/hm²+复合肥(15-15-15)450 kg/hm²配施的情况下安全利用。

参考文献:

- [1] 李琼,徐兴华,韦东普,等.城市污泥农用的环境效应及控制标准的研究进展[J].中国生态农业学报,2011,19(2):468-476.
- [2] McGrath S P, Chang A C, Page A L, et al. Land application of sewage sludge: scientific perspective of heavy metal loading limits in Europe and the United States [J]. Environmental Reviews, 1994, 2 (1): 108-118.
- [3] Gove L, Nicholson F A, Cook H F, et al. Comparison of effect of surface application and subsurface incorporation of enhanced treated biosolids on the leaching of heavy metals and nutrients through sand and sandy loam soils [J]. Environmental Technology, 2002, 23 (2): 189-198.
- [4] Sastre I, Vicente M A, Lobo M C. Behaviour of cadmium and nickel in a soil amended with sewage sludge [J]. Land Degradation & Development, 2001, 12 (1): 27-33.
- [5] 莫测辉,吴启堂,蔡全英,等.论城市污泥农用资源化与可持续发展[J].应用生态学报,2000,11(1):157-160.
- [6] NRC (National Research Council of USA). Biosolids applied to land: Advancing standards and practices [M]. Washington: National Academy Press, 2002. 13-79.
- [7] 薛澄泽,杜新科.复合污泥堆肥施用于高速公路绿化带效果的研究[J].农业环境科学学报,2000,19(5):204-208.
- [8] 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.
- [9] 许晓玲,呼世斌,刘晋波,等.施用污泥堆肥对土壤中重金属累积和大豆产量的影响[J].环境工程,2018,36(3):108-111.
- [10] 王新,周启星.土壤Hg污染及修复技术研究[J].生态学杂志,2002,21(3):43-46.
- [11] Türkdoğan M K, Kilicel F, Kara K, et al. Heavy metals in soil, vegetables and fruits in the endemic upper gastrointestinal cancer region of Turkey, Environ [J]. Environ Toxicol Pharmacol, 2003, 13 (3): 175-179.
- [12] Wang Q R, Cui Y S, Liu X M, et al. Soil contamination and plant uptake of heavy metals at polluted sites in China [J]. Journal of Environmental Science & Health Part A, 2003, 38 (5): 823-838.
- [13] Song U, Lee E J. Environmental and economic assessment of sewage sludge compost application on soil and plants in a landfill [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54 (12): 1109-1116.
- [14] 王社平,程晓波,姚岚,等.施用城市污泥堆肥对土壤和青椒重金属积累的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(9):1829-1836.
- [15] 王新,陈涛,梁仁禄,等.污泥土地利用对农作物及土壤的影响研究[J].应用生态学报,2002,13(2):163-166.
- [16] Walter I, Martinez F, Cala V. Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses [J]. Environmental Pollution, 2006, 139 (3): 507-514.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [18] 龙加洪,谭菊,吴银菊,等.土壤重金属含量测定不同消解方法比较研究[J].中国环境监测,2013,29(1):123-126.
- [19] 李海英,张学军,张书廷,等.利用污水厂污泥生产复混肥及对冬小麦增产效果研究[J].华南农业大学学报,2006,(1):21-24.
- [20] 陈同斌,李艳霞,金燕,等.城市污泥复合肥的肥效及其对小麦重金属吸收的影响[J].生态学报,2002,22(5):643-648.
- [21] 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.

- [22] Zhang M, Heaney D, Solberg E, et al. The effect of MSW compost on metal uptake and yield of wheat, barley and canola in less productive farming soils of Alberta [J]. *Compost Science & Utilization*, 2000, 8 (3): 224–235.
- [23] 梁丽娜, 徐智, 李季, 等. 污泥农用对土壤和作物重金属累积及作物产量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25 (6): 81–86.
- [24] Jones K C, Stratford J A, Waterhouse K S. Increases in the polynuclear aromatic hydrocarbon content of an agricultural soil over the last century [J]. *Environmental Science & Technology*, 1989, 23 (1): 95–101.
- [25] 申荣艳, 骆永明, 章钢娅, 等. 城市污泥农用对植物和土壤中有有机污染物的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2007 (2): 651–657.
- [26] 马晶晶. 污泥中有有机污染物对黑麦草生长的影响研究 [J]. *污染防治技术*, 2019, 32 (5): 5–8, 25.
- [27] Waqas M, Khan S, Qing H, et al. The effects of sewage sludge and sewage sludge biochar on PAHs and potentially toxic element bioaccumulation in *Cucumis sativa* L [J]. *Chemosphere*, 2014, 105: 53–61.
- [28] 余杰, 陈同斌, 高定, 等. 中国城市污泥土地利用关注的典型有机污染物 [J]. *生态学杂志*, 2011, 30 (10): 2365–2369.
- [29] Wang X, Chen T, Ge Y H, et al. Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 160: 554–558.
- [30] 吴伟祥. 堆肥污泥施用对植物生物量和污染物含量的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [31] 戴亮, 任珺, 陶玲, 等. 兰州市城市污泥施用对小麦生长和重金属富集的影响 [J]. *土壤通报*, 2012, 43 (5): 1257–1263.
- [32] Jahiruddin M, Livesey N T, Cresser M S. Observations on the effect of soil pH upon zinc absorption by soils [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1985, 16: 909–922.
- [33] 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*, 2007, 118: 319–326.
- [34] Lakhdar A, 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: 3524–3538.
- [35] Zhang L S, Xie Y S, Liu J Y, et al. An overlooked entry pathway of microplastics into agricultural soils from application of sludge-based fertilizers [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54 (7): 4248–4255.

Study on the effect of municipal sewage sludge on wheat yield, quality and safety

WU Sheng¹, ZHANG Jun-sen¹, ZHANG Jie-yu^{2*}, WANG Qiang¹, ZHANG Zhen¹, LI Guo-liang^{3, 4}, KANG Ting-ting^{3, 4}, MA You-hua¹ (1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei Anhui 230036; 2. Lu'an Vocational Technical College, Lu'an Anhui 237158; 3. Bengbu Qirun Environmental Engineering Technology Co. Ltd., Bengbu Anhui 233000; 4. Bengbu Sludge Treatment and Disposal and Resource Utilization Engineering Technology Research Center, Bengbu Anhui 233000)

Abstract: Aiming at the potential pollution risk of urban domestic sludge applied to farmland, field experiment was carried out to explore the impacts of the application of urban domestic sludge on the yield, quality and safety of wheat, in order to provide a basis for the utilization of urban domestic sludge in agriculture. The results showed that the application of municipal sewage sludge improved wheat yield. The yield of wheat under single application of domestic sludge (T₂, T₃) was increased by 83.85% ~ 139.04% compared with that of CK treatment. Within a certain range, the wheat yield increased with the increase of the amount of domestic sludge. The treatment of domestic sludge 2250 kg/hm² with compound fertilizer 450 kg/hm² (T₆) was more conducive to the increase of wheat yield, and the rational application of urban domestic sludge was conducive to the replacement of organic nutrients and the reduction of fertilizer. The application of municipal sewage sludge was beneficial to the improvement of wheat grain quality. Compared with CK treatment, the contents of wheat grain dry gluten, wet gluten and starch were significantly increased by applying domestic sludge, and the contents of wheat grain dry gluten and wet gluten were increased by 19.7%, 15.2% and 7.83% by applying domestic sludge alone at 6000 kg/hm² (T₃). The Cr content in wheat grains of some fertilizers treated with domestic sludge (T₄, T₉) exceeded the national limit (1 mg/kg). With the increase of domestic sludge, the risk of heavy metal enrichment in wheat grains increased, but the increase of different elements was different. The contents of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalates organic pollutants in wheat seeds were in line with the national food safety standards. For agricultural use of urban domestic sludge, it is recommended to apply it separately at the level of 6000 kg/hm². In the case of the combination application of domestic sludge and chemical fertilizer, 2250 kg/hm² of domestic sludge + compound fertilizer (15–15–15) 450 kg/hm² of dosage is recommended.

Key words: domestic sludge; wheat; production; quality; heavy metals; organic pollutant