市政污泥直接施用对玉米生长和品质的影响

占婷婷[1], 李 渊[1], 石 辉[1], 郭 平[2]

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安市城市管理局, 陕西 西安 710007)

摘 要: [目的] 研究市政污泥施用后对土壤和作物生长与品质的影响,为市政污泥的直接土地利用提供科学依据。[方法] 以玉米为试验材料,利用田间试验研究了污泥不同的施用方式(沟施、撒施、表土下 20 cm 施用)和施用量(30,90,200 t/hm^2)对玉米生长和品质以及土壤重金属含量的影响。[结果] 适量的污泥对玉米个体的生长有促进作用,施用量为 30 t/hm^2 时株高、单株生物量、叶片叶绿素含量、籽粒蛋白质含量均显著高于对照。表土下 20 cm 施用污泥在整体上较其他两种施用方式有更高的出苗率和籽粒产量,在施用量为 30 t/hm^2 时籽粒产量最高,为 656.70 kg/667m^2,高出对照 29.64%。3 种施用方式下,土壤中的 Cu,Zn,Pb 含量及玉米籽粒中的 Cu,Zn 含量均随污泥施用量的增加而增加,而玉米籽粒中 Pb 含量与对照相比差异不显著,土壤和籽粒中重金属含量均未超过国家相关标准。以重金属浓度满足土壤环境质量标准为限制条件,推算出当地的市政污泥施用量为 30 t/hm^2 可以连续施用 5 a。[结论] 施用 30 t/hm^2 的污泥具有良好的效果和环境效应;为了降低污泥在土壤中的局部累积而导致的胁迫效应,表土下 20 cm 施用和地表撒施是相对较好的方式。

关键词: 市政污泥; 土地利用; 施用方式; 玉米

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2019)05-0172-07 **中图分类号**: X705

文献参数: 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.024; Zhan Tingting, Li Yuan, Shi Hui, 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.

Effects of Direct Application of Municipal Sludge on Growth and Quality of *Zea Mays*

Zhan Tingting[1], Li Yuan[1], Shi Hui[1], Guo Ping[2]

(1. *School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi* 710055, *China*; 2. *Xi'an Municipal Administration of Urban Management, Xi'an, Shaanxi* 710007, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of municipal sludge application on crop growth and quality were analyzed in order to provide a scientific basis for the direct land use of municipal sludge. [Methods] Using *Zea mays* as the experimental material, a field experiment was conducted with different modes of sludge applications (furrow application, spraying application, and application of sludge 20 cm below the surface soil) and dosages (30, 90, and 200 t/hm^2) to investigate the effects of sludge application on maize growth and quality, and the accumulation of heavy metals in the soil. [Results] An appropriate amount of sludge can promote the individual growth of maize, plant height, biomass, and chlorophyll content in leaves, with the protein content of maize grain being significantly higher than that in the control when the dosage was 30 t/hm^2. Overall, the seed germination rate and grain yield were higher than those of the other two methods when the application of sludge occurred at 20 cm below the soil surface. When the dosage was 30 t/hm^2, the highest grain yield was 656.70 kg/667 m^2, which was 29.64% higher than that of the control. The concentrations of Cu, Zn, and

收稿日期:2019-04-03 **修回日期**:2019-04-25

资助项目:西安市科技计划项目"西安市城市污泥园林绿地应用技术与行业标准确立示范性研究"(201805082SF9SF16)

第一作者:占婷婷(1993—),女(汉族),安徽省桐城市人,硕士研究生,研究方向为市政污泥的土地利用。E-mail:zhanting126@163.com。

通讯作者:石辉(1968—),男(汉族),陕西省眉县人,博士生导师,教授,主要从事环境生态方面的教学研究工作。E-mail: shihui06@126.com。

Pb in the soil and the concentrations of Cu and Zn in the corn kernel increased gradually with increasing applications of sludge composts. However, there was no significant change in Pb content and the content of Cu, Zn, and Pb in the soil and corn kernel did not exceed the relevant national standards. Taking the concentration of heavy metals satisfying the soil environmental quality standard as the restriction condition, it was estimated that the ideal local municipal sludge application dosage was 30 t/hm^2, which could be applied continuously for 5 years. [Conclusion] The best environmental effect occurred when the sludge dosage was 30 t/hm^2; thus, to reduce the stress effect caused by the local accumulation of sludge in soil, the application of the sludge 20 cm below the soil surface using the spraying application method was ideal.

Keywords: municipal sludge; land application; method of application; *Zea mays*

随着社会经济的发展和城市人口的快速增长,城市污水的排放量日益增加,使得生活污水处理厂的污泥产量越来越大[1]。据统计,西安市 2017 年市政污泥日产生量已达 1 735 t,预计到 2020 年,日产污泥量约 3 825 t。如何安全处置和有效利用市政污泥已经成为亟待解决的重要问题之一。

由于市政污泥中含有丰富的有机质、植物所需的营养成分及各种微量元素[2],具有较好的植物可利用性及较高的农用价值,处理后的污泥可以用作苗圃、园林肥料和土壤改良剂等[3]。美国及欧洲等发达国家的污泥农业利用率达到了 40%～60%,而中国超过 80%的污泥通过土地填埋和露天堆放等不合理的方式进行处置,造成资源的浪费[4]。污泥的合理利用具有重要的现实意义,污泥农业利用是其中主要处置方式之一[5]。国内外很多研究表明,污泥农业利用可以促进作物生长,同时由于污泥自身的特性不可避免地也会增加土壤及作物中的重金属含量,重金属含量的增加与污泥施用量、污泥施用的形态及作物种类有关[6-8]。Latare 等[9]施用干污泥混合土壤种植水稻和小麦后发现,污泥施加量为 40 t/hm^2 时,水稻和小麦籽粒产量最高,较对照增加了 45%和 36%,其中水稻籽粒中重金属含量超标但小麦籽粒中未超标;但 Bourioug 等[10]却报道施用污泥堆肥 30,60 t/hm^2 后,与对照相比,并未显著增加欧洲落叶松幼苗体内 Cd,Pb,Zn 含量;戴亮等[11]通过盆栽试验发现,施用风干污泥后,玉米单株生物量显著高于对照,但出苗率和根长则受到不同程度的抑制,叶片叶绿素含量随污泥施加量呈先升后降的趋势;李淑芹等[12]研究发现施用污泥堆肥后,土壤中 Cu,Zn,Cd,Pb 含量及大豆不同器官中 Cu,Zn,Cd 的含量均随污泥施用量的增加而增加,但土壤和籽粒中 Cu,Zn,Cd,Pb 含量均未超过国家相关标准。而且近年来中国先后采用了更有效的污水处理技术和更严格的污水排放标准,对中国市政污泥中重金属进行大量统计分析发现,重金属含量呈下降趋势[13],这降低了污泥土地利用的环境风险,可提高中国市政污泥的农业资源化利用效率。

虽然许多学者在污泥农用方面做了大量研究,但通常是将风干污泥或堆肥化污泥与土壤混和后进行利用,目前国内外直接施用脱水污泥进行土地利用的研究鲜有报道,而且污泥的不同施用方式对土壤和植物的影响也少有研究。因此,本文参考农家肥的施用方法[14-15],将生活污水处理厂脱水污泥直接施用于农田,研究污泥的施用方式和施用量对玉米生长和品质的影响,以期为进一步提高市政污泥利用效率提供参考。

1　材料与方法

1.1　供试材料

供试污泥选用陕西省铜川市新耀污水处理厂脱水污泥(含水率为 65.37%),该厂污水主要来源于居民生活排放。试验地点为陕西省铜川市耀州区,供试土壤为黄墡土,当地年平均降水量 638.6 mm,5—9 月降水量占全年的 72%,年平均气温为 8.9～12.3 ℃,最高气温 36 ℃,最低气温 －10 ℃。污泥和土壤的基本成分及污染物含量如表 1 所示。试验期间当地降水量和气温如图 1 所示。供试作物为玉米,品种为陕单 609。

表 1　供试污泥和土壤养分及重金属含量

项目	pH 值	有机质/%	全氮/%	全磷/%	重金属/(mg·kg^{-1})		
					Cu	Zn	Pb
污泥	6.92	36.32	4.45	1.51	138.99±9.73	3 051.07±244.08	62.55±2.28
土壤	7.41	0.62	0.15	0.094	20.72±1.08	83.41±5.15	12.61±0.84

注:表中数据为平均值±标准误差。

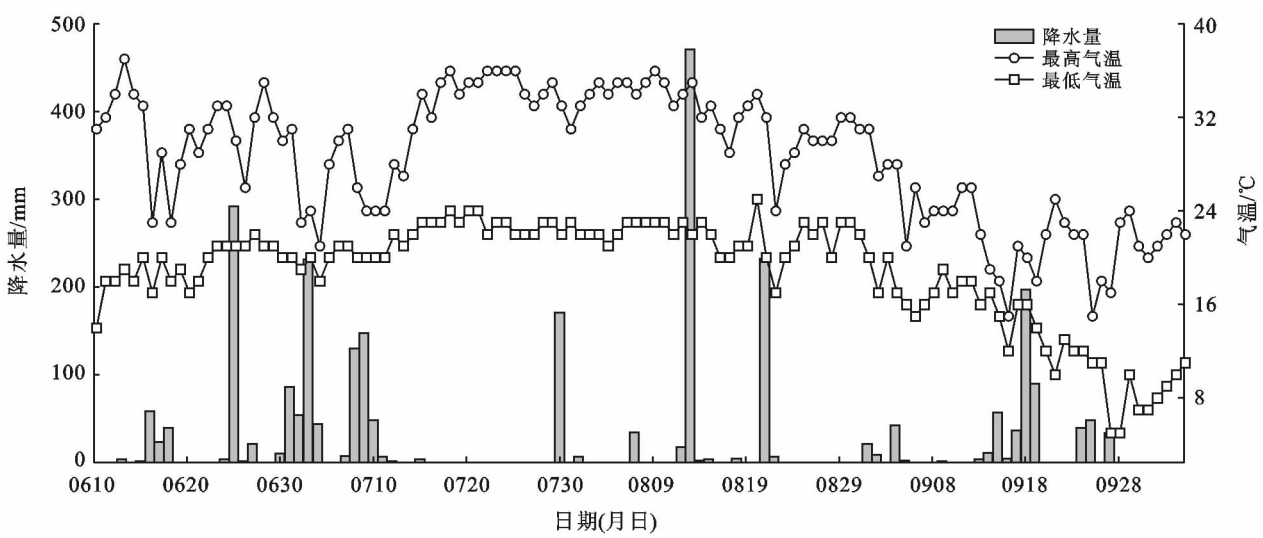


图 1 试验期间研究区的气温和降水量情况

1.2 试验设计

采用田间小区试验，每个小区面积为 20 m^2(5 m×4 m)，采用裂区试验，主处理 2 个：包括污泥施用方式和施用量。污泥施用方式分别采用沟施、撒施、表土下 20 cm 施用，污泥施加量分别为 30，90，200 t/hm^2。其中，沟施即在小区内开 4 条深约 10 cm，宽约 15 cm 的沟，沟内施加污泥两侧进行播种，根据不同施用量编号为 G_1，G_2，G_3；撒施即将污泥撒施在土壤表层，然后用小型旋耕机旋耕后播种，一般影响深度为 0—20 cm，根据不同施用量编号为 S_1，S_2，S_3；表土下施用污泥主要借鉴堆肥覆盖模式，以期解决污泥施用的异味问题；先将 20 cm 的表土剥离，将设计的用量的污泥撒施，然后将表土重新覆盖后进行播种，根据不同施用量编号为 D_1，D_2，D_3。再设置一组空白对照 CK，每个处理重复 3 次，共 30 个小区，试验小区随机分布。以上所有处理均施用 600 kg/hm^2 过磷酸钙(P_2O_5 含量 15%)和 240 kg/hm^2 硫酸钾(K_2O 含量 50%)作为基肥施入，玉米生长过程无追肥。玉米于 2018 年 6 月 20 日播种，10 d 后观察出苗情况，45 d 天后于玉米抽穗期测定株高和叶片叶绿素含量，种植 100 d 后收获，计算产量并采集植物样品。

1.3 样品的采集和处理

植物样品采集时，每个小区取 5 整株玉米样品，并将根、叶及籽粒分离出来，去离子水清洗干净，放入 105 ℃的鼓风干燥箱中杀青 30 min，然后 80 ℃烘干，用粉碎机粉碎成粉末过 60 目筛，装袋标记。在玉米收获期进行土壤样品采集，为保证采集样品的代表性，采用五点交叉取样法，每个小区随机取 5 点 0—15 cm 土壤混匀为 1 个样品，避免在田边、地角、路旁、污泥聚集区域等没有代表性的地方设点取样，3 种不同施用方式下均选择玉米植株生长区附近布点取样，将采集的土样经风干后用四分法取适量，研细过 100 目筛，密封标记保存。

1.4 测定方法

玉米出苗率的测定是在播种时每穴种 3 颗玉米种子，于 10 d 后计算各小区玉米出苗率。玉米叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和叶绿素总量的测定采用丙酮—乙醇混合液法[16]；玉米籽粒的蛋白质含量测定采用福林酚法[17]；土壤和污泥 pH 值测定采用电位法；有机质含量测定采用总有机碳分析仪；全氮测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法；全磷测定采用硝酸—高氯酸—氢氟酸消煮，钼锑抗比色法；Cu，Zn，Pb 的全量采用王水—高氯酸消煮后，原子吸收分光光度法测定；玉米各器官重金属含量采用硝酸—过氧化氢消煮后，ICP-MS(电感耦合等离子体质谱)测定。

1.5 数据处理

本文用 Excel 软件进行数据的计算与处理，用 SPASS 软件进行数据的单(双)因素方差分析，并用 Duncan's 法检验差异显著性($\alpha=0.05$)，用 Origin 软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤重金属含量的影响

由于污泥中的重金属含量偏高，向土壤中施入污泥必然会引起土壤中重金属含量的升高；且随着污泥用量的增加土壤重金属浓度增大。从表 2 中可以看出，与对照相比，200 t/hm^2 处理的撒施方式 Cu，Zn，Pb 与对照相比分别增加了 2.17，1.06，0.52 倍；沟施 Cu，Zn，Pb 浓度与对照相比分别增加了 1.41，0.63，

0.29 倍,表土下 20 cm 施用污泥 Cu,Zn,Pb 浓度与对照相比分别增加了 0.32,1.31,0.35 倍。在中国最新的土壤环境质量标准中,Cu,Zn,Pb 的最高上限值分别为 100,250,120 mg/kg[18],即使污泥施用量高达 200 t/hm² 土壤重金属含量均未超出标准限值。但 3 种施用方法,对污泥与土壤的混合程度不一,因此导致不同施用方法之间的土壤重金属浓度存在差异。

2.2　不同处理对玉米生长和籽粒产量的影响

由表 3 可知,沟施时,各污泥施用量下玉米出苗率均显著低于对照,且各处理之间差异显著,出苗率随施用量的增加呈降低趋势,施用污泥 200 t/hm² 处理时出苗率最低,较对照下降了 22.47%;撒施时,玉米出苗率随污泥施用量的增加呈先升后降趋势,且各处理之间差异显著,30 t/hm² 污泥施用量出苗率最高,较对照增加了 6.71%,30 t/hm² 污泥施用量时出苗率最低,较对照下降了 17.15%;表土下 20 cm 施用污泥,除污泥用量 90 和 200 t/hm² 处理组出苗率差异显著外,其余均差异不显著;不同的施用方式均表现出 200 t/hm² 污泥施用量对玉米出苗率有一定的抑制作用。撒施下施用量为 30 t/hm² 时出苗率最高。

表 2　不同试验处理对土壤重金属含量的影响

处理		含量/(mg·kg⁻¹)		
		Cu	Zn	Pb
沟施	CK	21.03±1.33^{d}	72.05±2.73^{d}	14.58±1.96^{b}
	G_1	27.46±2.55^{c}	79.47±3.57^{c}	14.47±1.96^{b}
	G_2	38.45±3.39^{b}	90.63±4.39^{b}	17.10±2.23^{ab}
	G_3	50.73±3.89^{a}	117.81±4.90^{a}	18.56±1.63^{a}
撒施	CK	21.03±1.33^{d}	72.05±2.73^{d}	14.58±1.96^{b}
	S_1	32.81±2.48^{c}	85.08±5.57^{c}	15.56±1.32^{b}
	S_2	45.75±2.68^{b}	108.38±7.41^{b}	19.45±1.09^{ab}
	S_3	66.84±3.19^{a}	149.01±4.09^{a}	22.16±1.46^{a}
表土下 20 cm 施用	CK	21.03±1.33^{d}	72.05±2.73^{d}	14.58±1.96^{b}
	D_1	25.11±1.93^{c}	76.36±3.75^{c}	15.50±1.23^{b}
	D_2	33.25±2.58^{b}	84.16±6.06^{b}	18.05±2.18^{ab}
	D_3	48.69±4.95^{a}	95.68±4.89^{a}	19.72±2.06^{a}

注:G_1,G_2,G_3 为污泥沟施不同用量的编号;S_1,S_2,S_3 为污泥撒施不同用量的编号;D_1,D_2,D_3 为污泥表土下施用不同用量的编号;表中数据为平均值±标准误差,同列英文小写字母不相同表明差异显著($p<0.05$)。下同。

表 3　各试验处理对玉米生长的影响

处理		出苗率/%	株高/cm	单株生物量/kg	籽粒产量/(kg·hm⁻²)
沟施	CK	88.53±4.25^{a}	205.11±3.91^{a}	0.52±0.05^{d}	7 598.11±780.75^{a}
	G_1	80.56±2.57^{b}	206.56±5.34^{a}	0.69±0.06^{a}	6 875.40±564.29^{b}
	G_2	75.13±3.96^{c}	196.89±3.27^{ab}	0.64±0.06^{b}	6 261.45±794.85^{c}
	G_3	68.64±4.05^{d}	192.22±5.34^{ab}	0.55±0.07^{c}	5 127.87±366.32^{d}
撒施	CK	88.53±3.25^{b}	205.11±3.91^{ab}	0.52±0.05^{b}	7 598.16±780.75^{b}
	S_1	94.47±6.75^{a}	216.22±5.34^{a}	0.66±0.05^{a}	9 622.51±671.64^{b}
	S_2	87.90±3.25^{b}	215.78±1.26^{a}	0.50±0.04^{c}	9 466.65±417.77^{ab}
	S_3	73.35±4.21^{c}	193.89±10.03^{bc}	0.48±0.04^{d}	6 161.25±931.05^{a}
表土下 20 cm 施用	CK	88.53±3.25^{ab}	205.11±3.91^{ab}	0.52±0.05^{b}	7 598.16±780.76^{b}
	D_1	87.94±4.01^{ab}	215.11±1.02^{a}	0.58±0.08^{a}	9 850.57±240.15^{b}
	D_2	90.71±3.12^{a}	204.44±1.02^{ab}	0.53±0.04^{b}	9 587.16±799.83^{ab}
	D_3	85.63±3.54^{bc}	190.45±0.39^{bc}	0.40±0.03^{c}	9 080.42±949.24^{a}

对于 3 种施用方式,各处理中株高与对照相比差异不大,单株生物量在污泥施用量 30 t/hm² 时显著高于对照,施用量为 200 t/hm² 时则显著低于对照;单株生物量最大在沟施、撒施和表土下 20 cm 施用污泥 30 t/hm²,较对照增加了 32.69%,26.92%,11.54%。说明污泥的适量施加对玉米的生长有促进作用,不同施用方法均在施用量为 30 t/hm² 时生长状况最佳。

沟施时各处理的籽粒产量均显著低于对照,且各处理之间差异显著,籽粒产量随施用量的增加呈降低趋势,沟施污泥 200 t/hm² 处理时籽粒产量最低,较对照下降了 32.51%;撒施时,籽粒产量随施用量的增加呈先升后降趋势,30 t/hm² 和 90 t/hm² 处理的籽粒产量显著高于对照,但撒施 30 t/hm² 和 90 t/hm² 处理之间差异不显著,撒施 30 t/hm² 时产量最高,较对照增加了 25.63%,撒施 200 t/hm² 处理时籽粒产量显著低于对照,较对照下降了 18.91%;表土下 20 cm 施用污泥时,各处理的籽粒产量均显著高于对照,但 30 t/hm² 和 90 t/hm² 处理之间差异不显著,表土下 20 cm 施用污泥 30 t/hm² 时籽粒产量最高,较对照增加了 29.64%,由此可知,表土下 20 cm 施用在整体上较其他 2 种施用方式有更高的籽粒产量,对籽粒产量进行双因素方差分析后知,污泥施用

方式和施用量对籽粒产量有显著性影响，其中表土下 20 cm 施用污泥 30 t/hm² 时籽粒产量最高（表 3）。这些差异，主要在于不同的施用方式污泥与土壤的混合不均匀，形成局部的污泥高浓度区，其中污泥的有毒有害物质影响了出苗和玉米的生长发育而致。

2.3 不同处理对玉米叶片叶绿素和籽粒蛋白质含量的影响

由图 2 可知，对于这 3 种施用方式，叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和叶绿素总量均随着污泥施用量的增加呈先升后降趋势。撒施时，30，90，200 t/hm² 处理中各指标值较对照相比均有显著性差异，但施用污泥 30 t/hm² 和 90 t/hm² 之间的差异不显著，施用污泥 200 t/hm² 处理中叶绿素 a 较对照下降了 27.52%；叶绿素 b 含量较对照下降了 25.91%；叶绿素总量较对照下降了 27.15%。表土下施用时，各处理中叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和叶绿素总量较对照相比均有显著性差异，30，90 t/hm² 施用量处理下增加最多，叶绿素 a 含量分别较对照增加了 53.39%，33.12%；叶绿素 b 含量均较对照增加了 26.94%；叶绿素总量分别较对照增加了 47.22%，31.74%。沟施时，除 200 t/hm² 处理中各指标值较对照相比无显著性差异外，其余处理均显著高与对照，30 t/hm²，90 t/hm² 施用量叶绿素 a 含量分别较对照增加了 14.98%，46.77%；叶绿素 b 含量分别较对照增加了 14.77%，45.60%；叶绿素总量分别较对照增加了 14.93%，46.49%。3 种施用方式下的所有处理中，只有地表下 20 cm 施用 30 t/hm² 污泥处理时叶绿素 a/b 的值显著高于对照，较对照增加了 20.72%，其余处理中叶绿素 a/b 的值与对照相比均无显著性差异。由此可以看出，污泥的适量施加可以使叶片叶绿素含量显著升高，光合作用能力加强，生长受到促进。

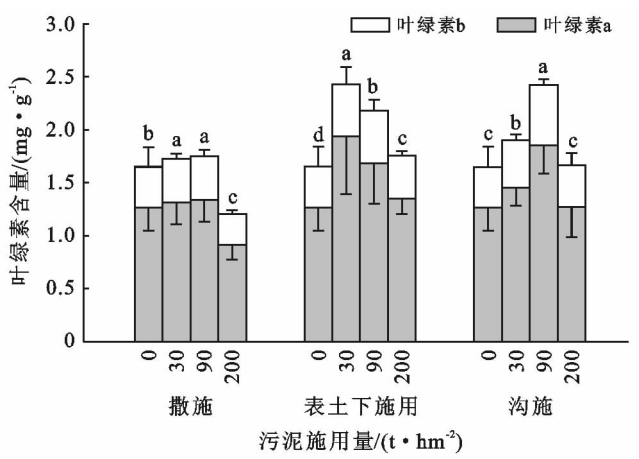


图 2 各试验处理对玉米叶片叶绿素的影响

由图 3 可知，沟施时，除 30 t/hm² 处理中籽粒蛋白质含量较对照相比差异不显著外，其余各组处理均差异显著，90，200 t/hm² 处理中籽粒蛋白质含量分别较对照增加了 13.15%，20.54%；撒施时，各处理中籽粒蛋白质含量较对照相比均有显著性差异，3 个施用量处理中籽粒蛋白质含量分别较对照增加了 21.85%，15.17%，9.13%，各处理之间差异显著。表土下 20 cm 施用时，各处理下籽粒蛋白质含量对照相比均有显著性差异，3 个施用量处理中籽粒蛋白质含量分别较对照增加了 22.82%，24.30%，38.52%。由此可见，在本试验的范围内，污泥的施用可以增加籽粒蛋白质含量，提高玉米品质。对籽粒蛋白质含量进行双因素方差分析后知，污泥施用方式和施用量对籽粒蛋白质含量有着显著性影响，其中表土下 20 cm 施用污泥 200 t/hm² 时籽粒蛋白质含量最高。

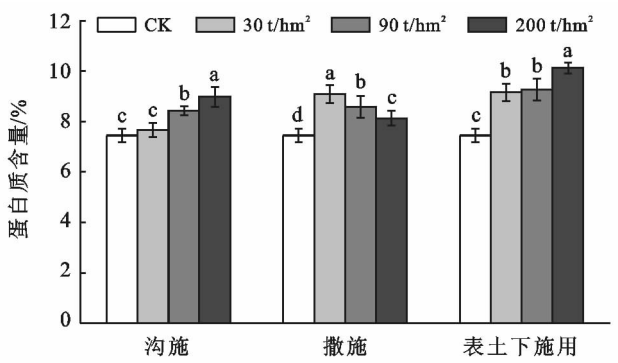


图 3 不同污泥施用量对玉米籽粒蛋白质的影响

2.4 不同处理玉米植株器官中重金属的分配

由表 4 可知，对于这 3 种施用方式，随着污泥施用量的增加玉米根和茎叶中的 Cu，Zn，Pb 含量均显著增加，呈现递增趋势。所有处理中 Cu，Zn，Pb 在玉米根部最大含量分别为高出对照 142.90%，81.06%，70.83%；Cu，Zn，Pb 在玉米茎叶中的最大含量分别高出对照 103.16%，55.21%，42.22%。籽粒中 Cu，Zn 含量也随污泥施用量的增加呈递增趋势，最大含量分别高出对照 26.77%，94.78%，而籽粒中 Pb 含量与对照相比差异不显著。Cu，Pb 在玉米各器官中的分布规律是：根＞茎叶＞籽粒，Zn 在玉米各器官中的分布规律是：茎叶＞根＞籽粒。根据中国最新食品污染物限量标准规定[19]，谷物中 Pb 的最高上限浓度为 0.2 mg/kg，对 Cu，Zn 则没有限定，因此本试验处理中玉米籽粒中各重金属含量均低于标准限值。

表 4　玉米根、茎叶和籽粒的重金属含量　　mg/kg

处理	Cu 含量			Zn 含量			Pb 含量		
	根	茎叶	籽粒	根	茎叶	籽粒	根	茎叶	籽粒
CK	12.47±0.91^{d}	10.14±1.55^{bc}	1.98±0.42^{ab}	31.58±2.04^{d}	46.10±1.72^{bc}	20.69±0.95^{c}	3.12±0.28^{c}	2.25±0.33^{bc}	0.13±0.04^{a}
G_1	15.33±1.28^{c}	12.53±1.30^{b}	2.11±0.71^{ab}	39.23±2.32^{c}	52.45±2.23^{b}	28.03±1.12^{b}	3.58±0.19^{bc}	2.55±0.50^{bc}	0.12±0.06^{a}
G_2	21.56±1.59^{b}	17.82±1.49^{a}	2.37±0.51^{a}	52.77±1.94^{bc}	66.47±3.37^{a}	36.54±2.06^{ab}	4.16±0.26^{b}	2.94±0.21^{ab}	0.13±0.04^{a}
G_3	29.68±1.97^{a}	18.13±1.16^{a}	2.50±0.36^{a}	56.68±3.71^{a}	68.32±4.01^{a}	39.87±1.54^{a}	5.25±0.33^{a}	3.20±0.19^{a}	0.15±0.02^{a}
CK	12.47±0.91^{d}	10.14±1.55^{c}	1.98±0.42^{ab}	31.58±2.04^{d}	46.10±1.72^{c}	20.69±0.95^{c}	3.12±0.28^{c}	2.25±0.33^{b}	0.13±0.04^{a}
S_1	16.67±1.53^{c}	13.65±1.12^{b}	2.07±0.39^{ab}	41.33±1.87^{c}	55.16±3.62^{bc}	26.89±1.16^{b}	4.13±0.17^{b}	2.32±0.42^{b}	0.13±0.04^{a}
S_2	20.83±1.18^{b}	14.14±0.96^{b}	2.33±0.35^{a}	50.65±3.70^{b}	60.46±0.38^{b}	37.17±3.01^{ab}	4.27±0.28^{b}	3.17±0.18^{a}	0.14±0.02^{a}
S_3	30.29±2.10^{a}	20.60±1.42^{a}	2.51±0.47^{a}	57.18±2.68^{a}	71.55±0.52^{a}	40.30±2.89^{a}	5.33±0.21^{a}	2.85±0.23^{ab}	0.14±0.04^{a}
CK	12.47±0.91^{cd}	10.14±1.55^{bc}	1.98±0.42^{ab}	31.58±2.04^{d}	46.10±1.72^{c}	20.69±0.95^{c}	3.12±0.28^{bc}	2.25±0.33^{bc}	0.13±0.04^{a}
D_1	14.89±1.61^{c}	12.07±0.89^{b}	2.05±0.46^{ab}	37.96±2.21^{c}	53.26±2.89^{b}	25.74±1.38^{b}	3.66±0.15^{bc}	2.66±0.25^{ab}	0.14±0.05^{a}
D_2	19.37±1.53^{b}	13.23±1.55^{ab}	2.26±0.52^{a}	48.12±1.53^{b}	55.21±3.02^{b}	35.82±1.19^{ab}	4.08±0.32^{b}	2.95±0.16^{a}	0.15±0.02^{a}
D_3	26.15±1.92^{a}	15.95±1.28^{a}	2.19±0.51^{a}	54.77±5.22^{a}	62.88±3.36^{a}	33.56±2.07^{a}	5.17±0.26^{a}	3.10±0.41^{a}	0.15±0.06^{a}

3　讨 论

污泥施用方式和施用量都对玉米出苗率和籽粒产量有着显著性影响,3 种不同方式下均在施用量为 30 t/hm^2 时有最高的籽粒产量。沟施时出苗率和籽粒产量随污泥施用量的增加呈下降趋势,施用量为 200 t/hm^2 时出苗率和籽粒产量最低,较对照分别下降了 22.47%和 32.51%。市政污泥含水量高,成分复杂,呈交接状,一般难以与土壤充分混合,导致局部地点的物质浓度过高,从而形成各种的胁迫作用,对作物的出苗极为不利。在我们的试验中,可能由于沟施时播种区接近污泥聚集区,污泥内部含有高的盐分、重金属和有机酸等有害物质会导致有毒的氧自由基的形成[20],这些影响了其出苗率。而撒施时是将污泥和土壤均匀混合,表土下施用时污泥层上方覆盖了 15—20 cm 的土层,播种深度一般在 5 cm 以内,种子萌发时并没有直接接触到污泥,因此在同一污泥施用量下,撒施和表土下 20 cm 施用与沟施相比有较高的出苗率和产量。因此市政污泥的施用,需要注意不能形成局部污泥的聚集。

这 3 种施用方式下,株高、单株生物量和叶绿素含量均随着污泥施用量的增加呈先升后降趋势,表明污泥在低施用量时对玉米的生长有促进作用,高施用量时污泥中的重金属离子被吸收利用且在植株体内积累,抑制了植物体内叶绿素酶的合成以及质膜 ATP 酶等酶促反应酶的活性,影响叶绿素生物合成的过程中的酶促反应[21],而叶绿素含量的高低在很大程度可以反映了植株的光合作用和生长状况,继而影响株高和生物量。对于籽粒蛋白质含量,不同施用方式下所有处理中籽粒蛋白质含量均显著高于对照处理,表土下 20 cm 施用 200 t/hm^2 污泥时籽粒蛋白质含量最高,高出对照 38.52%。其中,撒施时籽粒蛋白质含量随污泥施用量的增加呈现先升后降的趋势,可能是随着施用量增加,土壤中合成蛋白质的必需元素 N 含量增加,同时玉米生长所需其它营养元素也相应增加,在一定的浓度范围内促进玉米的生长,而高施用量时污泥中重金属等有毒离子被大量吸收并富集,玉米体内蛋白质合成酶变性或活性降低,表现出蛋白质的含量降低[22]。

重金属在玉米植株各器官中的分布结果表明,本试验处理中籽粒中各重金属含量均符合食品污染物限量标准(Pb 的最高上限为 0.2 mg/kg,对 Cu、Zn 则没有限定)。籽粒中 Cu,Zn 含量随污泥施用量的增加呈递增趋势,而籽粒中 Pb 含量与对照相比差异不显著,这可能是由于污泥中 Pb 在土壤上层很容易被固定与土壤有机物形成配合物,进入土壤的 Pb 只有少部分是溶解态,而溶解态的 Pb 一般只有 0.1%～0.3%被植物吸收[23]。Cu,Pb 在玉米各器官中的分布规律是:根>茎叶>籽粒,Zn 在玉米各器官中的分布规律是:茎叶>根>籽粒,这可能是由于 Zn 是植物体内碳酸酐酶等与植物的光合作用相关的一些酶的重要组分,在植物生长期光合作用活跃,茎叶对 Zn 需求量就大[24]。这与李静等[25]关于某锌厂周围土壤的玉米器官中重金属的分布特征报道基本一致。本研究表明污泥最佳处理方式为表土下施用污泥 30 t/hm^2,在此处理下玉米生长状况最佳,且土壤和籽粒中重金属含量也未超过国家相关标准,根据中国土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准限定,Cu,Zn,Pb 的最高上限值分别为:100,250,120 mg/kg,而表土下施用 30 t/hm^2 污泥时土壤中 Cu,Zn,Pb 含量为:25.11,76.36,15.5 mg/kg,其中 Zn 为限制性元素,以不超过最新土壤环境质量标准为参考,计算每年施用污泥 30 t/hm^2 可以连续施用 5 a[26]。

4 结 论

市政污泥直接施用于土壤，不同的施用方式、不同的污泥用量对土壤中 Cu，Zn，Pb 重金属的积累和玉米的生长发育均有显著的影响。污泥的施用量不超过 200 t/hm^2，土壤中 Cu，Zn，Pb 满足土壤环境质量标准的要求。施用市政污泥之后，玉米的株高、单株生物量和叶片叶绿素含量均显著高于对照；玉米籽粒中 Cu，Zn 的含量随污泥施用量增加而逐渐增加，籽粒中 Pb 含量较对照差异不显著，均满足国家农产品质量标准要求。由于污泥成分的复杂性和结构的交联性，施入土壤的污泥在土壤中的局部累积导致出苗率的降低，因此避免污泥与种子接触的地表下 20 cm施用污泥的效果良好，其次为撒施。综合考虑，表土下 20 cm 施用 30 t/hm^2 的污泥时玉米生长状况最佳。由于污泥中较高的重金属在土壤中的累积，成为施用污泥的限制因素；在研究区以重金属浓度满足土壤环境质量标准为限制条件，推算出当地的市政污泥施用量为 30 t/hm^2 可以连续施用 5 a。

[参 考 文 献]

[1] 乔显亮，骆永明，吴胜春. 污泥的土地利用及其环境影响[J]. 土壤，2000，32(2)：79-85.

[2] 翟云波，魏先勋，曾光明，等. 城市污水处理厂污泥资源化利用途径探讨[J]. 工业水处理，2004，24(2)：8-11.

[3] Fytili D，Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods：A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2008，12(1)：116-140.

[4] Yang Guang，Zhang Guangming，Wang Hongchen. Current state of sludge production，management，treatment and disposal in China[J]. Water Research，2015，78：60-73.

[5] 刘梦娇，夏少攀，王峻，等. 城市污泥农用对植物—土壤系统的影响[J]. 应用生态学报，2017，28(12)：4134-4142.

[6] Singh R P，Agrawal M. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of Beta vulgaris plants[J]. Chemosphere，2007，67(11)：2229-2240.

[7] 徐欣，张盼月，张光明，等. 共消化污泥施用对贫瘠土壤性质和蔬菜品质的影响[J]. 农业环境科学学报，2012，31(9)：1842-1847.

[8] 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.

[9] Latare A M，Kumar O，Singh S K，et al. Direct and residual effect of sewage sludge on yield，heavy metals content and soil fertility under rice-wheat system[J]. Ecological Engineering，2014，69：17-24.

[10] Bourioug M，Alaoui-Sossé L，Laffray X，et al. Evaluation of sewage sludge effects on soil properties，plant growth，mineral nutrition state，and heavy metal distribution in European larch seedlings (*Larix decidua*)[J]. Arabian Journal for Science and Engineering，2014，39(7)：5325-5335.

[11] 戴亮，任珺，张军平，等. 污泥施用土壤对玉米的生态毒性效应[J]. 兰州交通大学学报，2011，30(6)：143-147.

[12] 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.

[13] 余杰，李宇佳，牟江涛，等. 中国城市污泥土地利用限制性因素及前景分析[J]. 环境科学与管理，2016，41(7)：64-68.

[14] 蔡联合，韦建玉，白森，等. 农家肥不同施用方式对烟草生长及烤烟品质的影响[J]. 南方农业学报，2012，43(3)：336-340.

[15] 苟莉珊，张欢，周奎兵，等. 农家肥不同施用法对高原粳稻产量的影响[J]. 西昌学院学报：自然科学版，2014，28(4)：8-10.

[16] 张宪政. 植物叶绿素含量测定：丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业科学，1986(3)：26-28.

[17] 何照范. 粮油籽粒品质及其分析技术[M]. 北京：中国农业出版社，1985：41-45.

[18] 生态环境部，国家市场管理监督总局. GB 15618-2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S]. 北京：中国标准出版社，2018.

[19] 中国标准出版社. GB2763-2012 食品中农药最大残留限量 农药残留限量标准[S]. 北京：中国标准出版社，2017.

[20] Hei Liang，Lee C C C，Wang Hui，et al. Using a high biomass plant *Pennisetum hydridum* to phyto-treat fresh municipal sewage sludge[J]. Bioresource Technology，2016，217：252-256.

[21] 孔繁翔. 环境生物学[M]. 北京：高等教育出版社，2000：139-141.

[22] 赵晓莉，朱伟. 城市污泥农用对生菜理化指标和品质的影响[J]. 生态环境，2008，17(1)：99-104.

[23] 南忠仁，程国栋. 干旱区污灌农田作物系统重金属 Cd，Pb 生态行为研究[J]. 农业环境保护，2001，20(4)：210-213.

[24] Hu Xueyu，Li Xueyuan. Bioavailability of Zn as affected by root-induced changes of pakchoi cultivars with different Zn efficiencies[J]. Journal of Soils and Sediments，2009，9(3)：188-193.

[25] 李静，依艳丽，李亮亮，等. 几种重金属(Cd，Pb，Cu，Zn)在玉米植株不同器官中的分布特征[J]. 中国农学通报，2006，22(4)：244-247.

[26] 马闯，赵继红，张宏忠，等. 城市污泥土地利用安全施用年限估算[J]. 环境工程，2014，32(6)：102-104.