

# 兰州市城市污泥施用对玉米生理特性的影响

戴亮<sup>1,2</sup>,任珺<sup>1,2</sup>,陶玲<sup>1,2</sup>,宋小三<sup>1,2</sup>

(1.兰州交通大学环境与市政工程学院,甘肃兰州730070;2.寒旱地区水资源综合利用教育部工程研究中心,甘肃兰州730070)

**摘要:**通过盆栽试验,研究了不同污泥处理(污泥在混配土壤中的干重比例分别为0.5%、10%、15%、25%、35%)对3个玉米品种(丰试88、沈单16、丰试9713)部分生理指标的影响。结果表明:污泥施用后,3个玉米品种生物量均增加明显;3个玉米品种叶绿素总含量随着污泥施加量的增加呈现先升后降的趋势;3个玉米品种叶片的脯氨酸含量与对照相比均有大幅的上升,但并未出现阈值;3个玉米品种叶片丙二醛含量都随着污泥施加量的加大呈上升趋势,丰试88上升幅度最大,而沈单16上升幅度最小。玉米通过增加体内保护酶活性和渗透调节物质含量来缓解污泥中污染物带来的膜脂过氧化伤害。污泥施用后土壤中Cu、Pb、Zn含量显著增加,但未超过我国土壤环境质量二级标准(GB15618-1995)。土壤中3种重金属含量与3个玉米品种体内脯氨酸和丙二醛含量均呈显著正相关关系,土壤中重金属污染物是植物产生逆境的重要原因之一。污泥在混配土壤中的干重比低于25%时,玉米对污泥的施加表现出较强的适应能力及耐受能力。

**关键词:**污泥;玉米;叶绿素;脯氨酸;丙二醛

**中图分类号:** X171.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)01-0133-07

## Effects of municipal sewage sludge on physiological properties of three varieties of maize in Lanzhou

DAI Liang<sup>1,2</sup>, REN Jun<sup>1,2</sup>, TAO Ling<sup>1,2</sup>, SONG Xiao-san<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Engineering Research Center for Cold and Arid Regions Water Resource Comprehensive Utilization, Ministry of Education, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** The application of sewage sludge on agricultural soils is a promising disposal and utilizable method to improve soil properties and increase plant productivity. The experimental results showed that three varieties of maize (Fengshi 88, Shendan 16, and Fengshi 9713) could grow well and the maize biomass increased significantly after sewage sludge application (the dry weight ratio of sludge to the mixed soil of 5%, 10%, 15%, 25%, 35%). With land application of sewage sludge, the total chlorophyll of three varieties of maize increased at first, and then decreased. The leaf proline content of three varieties of maize showed a big increase after sewage sludge application compared with the control treatment, but a threshold value did not appear. The leaf MDA content of three varieties of maize all increased. However, 'Fengshi 88' had the largest increment, while 'Shendan 16' increased the least. Maize heightened the protective enzyme activity and the content of adjusting osmotic substance to alleviate the oxidative damage to membrane lipid by sludge. The contents of Pb, Cu, and Zn in the soil increased with the increase of sewage sludge application, but not exceeding the standards of soil environmental quality for Grade II (GB15618-1995). The contents of Pb, Cu, and Zn in the soil had significantly positive correlation with the contents of proline and MDA in the leaves of three varieties of maize. When sludge application rate was less than 25%, maize showed strong adaptability and tolerance.

**Keywords:** sewage sludge; *Zea mays*; chlorophyll; proline; MDA

污水处理厂在污水处理过程中会产生大量的污泥,随着我国城市化进程的推进及城镇人口的迅速增长,2010年中国城市污水处理厂的数量达到2000多座<sup>[1]</sup>。污泥中存在着难降解的有机物、病原

收稿日期:2012-03-10

基金项目:甘肃省自然科学基金(1208RJZA233);甘肃省自然科学基金(1014RJZA043);甘肃省自然科学基金(0916RJZA035)

作者简介:戴亮(1979—),男,博士生,主要从事污染生态学研究。E-mail: dailiang818@mail.lzjtu.cn。

菌、寄生虫卵及重金属等有害物质,如处理不当会造成二次污染,对环境构成潜在的污染危害。将量巨大、成分复杂的污泥无害化、资源化,已成为摆在我们面前迫切需要解决的问题<sup>[2]</sup>。污泥处置的方式主要有 4 种,分别为填埋、焚烧、水体消纳和土地利用,其中污泥土地利用是最有发展前景、经济有效的一种污泥处置方法。污泥中含有丰富的 N、P、K 和有机质等植物生长必需的营养成分,施用后能够改善土壤物理性状、增加土壤肥力,促进农作物、花卉、树木等的生长<sup>[3]</sup>。法国、西班牙、波兰、挪威和丹麦等欧洲国家城市污泥土地利用均超过 50%<sup>[4-5]</sup>。我国污泥处理利用技术落后,污泥土地利用与国外相比也有较大的差距。污泥的土地利用,对于我国西北这样一个荒漠化严重且拥有相当大的中低产土壤面积的地区<sup>[6]</sup>,具有重要的现实意义。

目前,有关污泥土地施用对农作物影响的研究多集中在对农作物的生长和重金属富集领域,而且

研究地域多集中在我国东部发达地区<sup>[1,3]</sup>,对于西北地区污泥施用对农作物生理指标影响方面的研究少见报道。本文通过盆栽试验,研究城市污泥施用对 3 个玉米品种的部分生理指标的影响,旨在为西北地区科学的污泥处理处置及保障农产品安全提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试污泥选用兰州安宁区污水处理厂脱水污泥,该厂污水主要来源于城市居民生活排放,于 2009 年 9 月采集污泥样品,将采集的污泥样品经自然风干、粉碎、过 100 目筛,装袋备用。试验所用土壤采自兰州市花卉培养基地。分析污泥和土壤的基本成分及污染物含量(表 1)。供试作物为玉米,种子购于甘肃省农科院,品种为在西北地区广泛栽种的丰试 88、沈单 16 和丰试 9713。

表 1 供试污泥和土壤的养分及重金属含量

Table 1 Contents of nutrients and heavy metals in sewage sludge and soil

项目 Items	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> ) OM	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> ) TN	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> ) TP	pH	重金属 Heavy metal/(mg·kg <sup>-1</sup> )		
					Cu	Zn	Pb
污泥 Sludge	286 ± 16.5	13.1 ± 1.7	15.4 ± 0.9	6.82 ± 0.34	354.11 ± 29.12	420.65 ± 32.02	157.84 ± 24.76
土壤 Soil	20.3 ± 1.8	1.6 ± 0.2	1.5 ± 0.4	8.09 ± 0.21	18.21 ± 1.22	55.89 ± 1.21	3.22 ± 0.91

注:表中数据为平均值 ± 标准误差。

Notes: Data are reported as mean ± standard deviation.

### 1.2 研究方法

试验于 2010 年在兰州交通大学环境与市政工程学院院内遮雨棚下进行。本研究采用盆栽试验,塑料盆上内径 30 cm,下底内径 24.0 cm,高 25 cm,试验时装土距盆口 2 cm。试验共设 6 种处理,按照污泥在混配土壤中的干重比例为 0、5%、10%、15%、25% 和 35% 分别进行混配,记作 CK、S1、S2、S3、S4、S5,每处理重复 3 次。污泥按设计浓度与土壤充分混均,装入塑料盆中,每盆基质重 4.0 kg。混合土壤平衡一个月后栽种玉米。4 月上旬栽种玉米,定期浇水,植物生长 120 d 后,对其新鲜叶片迅速采样进行指标测定。

土壤 pH 值测定采用电位法,土壤和污泥有机质含量采用重铬酸钾法<sup>[7]</sup>。土壤全氮采用半微量凯氏定氮法<sup>[7]</sup>。土壤全磷采用三酸(硝酸-高氯酸-氢氟酸)消煮,钼锑抗比色法<sup>[7]</sup>。污泥和土壤中的钾、锌、铜、铅的全量测定采用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 消煮-电感耦合等离子发射仪(ICP-AES)测定法<sup>[7]</sup>。

叶绿素含量的测定采用丙酮乙醇混合液法<sup>[8]</sup>,取新鲜叶片 0.5 g 剪碎并且装入三角瓶中,加入 50 mL 1:1 乙醇丙酮混合液在常温下过夜,至植物组织变白。取清液用分光光度法以混合液为对照,用分光光度计在 663、652 nm 和 645 nm 波长处比色。按(1)、(2)和(3)式分别计算叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的含量。

$$\text{叶绿素 a 的含量 (mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = (12.7D_{663} - 2.69D_{645}) V / 1000 \times W \quad (1)$$

$$\text{叶绿素 b 的含量 (mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = (22.9D_{645} - 4.68D_{663}) V / 1000 \times W \quad (2)$$

$$\text{总叶绿素含量 (mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = D_{652} V / 34.5 \times W \quad (3)$$

脯氨酸含量测定采用磺基水杨酸法<sup>[9]</sup>,取新鲜叶片 0.5 g 剪碎放入试管中,加入 3% 磺基水杨酸溶液 3 mL 于沸水浴中浸提 10 min,取 2 mL 提取液于试管中,加入 2 mL 冰醋酸和 2.5% 酸性茚三酮 2 mL 置沸水浴中显色 40 min,加入 4 mL 甲苯萃取,取上清液在 3 000 r·min<sup>-1</sup> 转速下离心 5 min,用分光光度

法于 520 nm 波长处比色。根据标准曲线的回归方程  $Y = 0.0512X + 0.0132$  来计算样品中脯氨酸含量。

丙二醛含量测定采用硫代巴比妥酸 (TBA) 法<sup>[9]</sup>,称取新鲜叶片 0.2 g 剪碎后放入试管中,加入 2 mL 10% TCA 和少量石英砂,研磨至匀浆,再加 8 mL TCA 进一步研磨,匀浆离心 10 min,上清液为样品提取液。吸取离心的上清液 2 mL,加入 2 mL 0.6% TBA 溶液,混匀物于沸水浴上反应 15 min,迅速冷却后再离心。取上清液测定 532、600 nm 和 450 nm 波长下的消光度。按公式(4)求出样品中糖分在 532 nm 处的消光度值  $Y_{532}$ ,用实测 532 nm 的消光度值减去 600 nm 非特异吸收的消光度值再减去  $Y_{532}$ ,其差值为测定样品中 MDA-TBA 反应产物在 532 nm 的消光度值。按 MDA 在 532 nm 处的毫摩尔消光系数为 155 换算求出提取液中 MDA 浓度。根据公式(5)计算测定样品中 MDA 的含量。

$$Y_{532} = -0.00198 + 0.088D_{450} \quad (4)$$

$$\text{MDA}(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}) = \text{MDA 浓度}(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}) \times \text{提取液体积}(\text{mL}) / \text{植物组织鲜重}(\text{g}) \quad (5)$$

用 STATISTICA (Version 6.0) 和 Microsoft Excel 软件对数据进行单因素方差分析,并用 Duncan 氏法进行平均值间的多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 污泥施用对土壤重金属总量的影响

不同污泥施用量对土壤中 Cu、Pb、Zn 含量的影响均达到极显著差异水平(表 2)。不同污泥施用量土壤 3 种重金属的含量均显著高于对照,3 种重金属含量与污泥施加量均呈显著线形递增关系。不同污泥施加量土壤中的重金属含量之间均差异显著。处理 S5 土壤中 Cu、Pb、Zn 含量均达到最大值。3 种重金属在污泥混配土壤中含量的大小顺序为: Zn > Cu > Pb。最大污泥施用量时,3 种重金属中 Pb 的含量与对照含量相比增幅最大,达到了近 12 倍,Cu 的增幅为 3.5 倍,Zn 的增幅为 2.4 倍。

表 2 污泥施用对土壤重金属含量的影响

Table 2 Effect of sewage sludge application on the concentration of heavy metals in the soil/(mg·kg<sup>-1</sup>)

污泥处理 Sludge treatment	Cu	Zn	Pb
CK	18.21 ± 0.83f	55.89 ± 1.22f	3.22 ± 0.25f
S1	23.83 ± 1.29e	65.20 ± 0.1e	8.41 ± 0.99e
S2	33.37 ± 1.92d	75.29 ± 2.53d	13.64 ± 0.72d
S3	45.30 ± 1.3c	87.97 ± 2.82c	19.65 ± 1.25c
S4	62.95 ± 4.2b	106.33 ± 1.81b	28.59 ± 1.31b
S5	81.17 ± 1.36a	132.68 ± 3.85a	38.42 ± 1.12a
F 值 F-value	373.92 ***	429.15 ***	508.89 ***
土壤环境质量二级标准(GB-15618-1995) <sup>[10]</sup> The environmental quality standards for soils for Grade II (GB-15618-1995) <sup>[10]</sup>	100	300	350

注:表中数据为平均值 ± 标准误差,同一列中不同小写字母表示差异显著(Duncan 检验法,  $P = 0.05$ )。\* 代表  $P < 0.05$  水平; \*\* 代表  $P < 0.01$  水平; \*\*\* 代表  $P < 0.001$  水平。下同。

Notes: Data are reported as mean ± standard deviation. Followed by the different lower-case letter in the same column indicate significant difference, according to Duncan's Multiple Test,  $P = 0.05$ . \* mean significant,  $P < 0.05$ , \*\* mean significant,  $P < 0.01$ , \*\*\* mean significant,  $P < 0.001$ , respectively. The same as in the following tables.

### 2.2 污泥施用对玉米生物量的影响

3 个玉米品种各污泥施加量处理单株生物量干重均高于其对照(表 3)。丰试 88 在污泥施加量为 S3、S4 时单株生物量要显著高于对照,其它各施加量与对照差异不显著,单株生物量在污泥施加量为 S4 时达到最大值,与对照相比增幅为 60.85%。沈单 16 在污泥施加量为 S1 时单株生物量与对照相比差异不显著,其它污泥施加量均显著高于对照,在 S2 时单株生物量达到最大值,与对照相比增幅为

65.74%。沈单 16 在污泥施加量为 S2、S3、S4、S5 时的单株生物量之间差异不显著。丰试 9713 在污泥施加量为 S4、S5 时单株生物量与对照相比差异不显著,其它 3 种施加量均显著高于对照,在污泥施加量为 S3 时达到最大值,与对照相比增幅为 58.26%。

### 2.3 污泥施用对玉米叶片叶绿素含量的影响

3 个玉米品种叶绿素 a 含量在不同污泥施用量处理下均表现出极显著差异( $P < 0.001$ ),施污后 3 个玉米品种叶绿素 a 的含量均高于对照(表 4)。不

表 3 污泥施用对玉米生物量的影响

Table 3 Effects of sewage sludge application on maize height/(g·plant<sup>-1</sup> DW)

污泥处理 Sludge treatment	丰试 88 Fengshi 88	沈单 16 Shendan 16	丰试 9713 Fengshi 9713
CK	2.58 ± 0.19b	1.08 ± 0.09c	1.15 ± 0.13d
S1	2.94 ± 0.23b	1.32 ± 0.16bc	1.54 ± 0.17b
S2	2.83 ± 0.13b	1.79 ± 0.14a	1.45 ± 0.07bc
S3	3.61 ± 0.41a	1.64 ± 0.15ab	1.82 ± 0.12a
S4	4.15 ± 0.39a	1.57 ± 0.23ab	1.28 ± 0.08cd
S5	2.90 ± 0.24b	1.69 ± 0.12a	1.38 ± 0.04bcd
F 值 F-value	8.63**	6.01**	9.17***

同污泥施用量条件对沈单 16 和丰试 9713 的叶绿素 b 的含量的影响达到极显著差异水平 ( $P < 0.001$ ), 但对丰试 88 叶绿素 b 的含量无显著影响。污泥对 3 个玉米品种叶绿素总含量的影响均达到较显著差异

水平 ( $P < 0.01$ ), 对 3 个玉米品种叶片叶绿素 a/b 的值的影响均达到极显著差异水平 ( $P < 0.001$ )。污泥施加后玉米叶片叶绿素总含量增加显著。玉米丰试 88 和沈单 16 在各污泥施加量时的叶绿素总含量均显著高于对照。丰试 9713 在污泥施加量为 S1 时叶绿素总含量与对照相比差异不显著, 其它污泥施加量叶绿素总含量均显著高于对照。随着污泥施加量的增加, 3 个玉米品种叶绿素总含量先增加后降低, 在污泥施加量为 S4 时均达到最大值。丰试 88 在各污泥施用量时的叶绿素 a/b 的值均显著高于对照。沈单 16 在最大污泥施加量 S5 时叶绿素 a/b 的值显著高于对照, 其它污泥施加量时与对照相比差异不显著。丰试 9713 在污泥施加量为 S1 时叶绿素 a/b 的值显著高于对照, 其它施加量时均显著低于对照。

表 4 污泥土地利用对 3 个玉米品种生理指标的影响

Table 4 Effects of sewage sludge application on physiological indexes of three kinds of maize

玉米种类 Maize varieties	污泥处理 Sludge treatment	叶绿素 Chlorophyll/(mg·g <sup>-1</sup> FW)				脯氨酸 Proline /(μg·g <sup>-1</sup> FW)	丙二醛 MDA /(μmol·g <sup>-1</sup> FW)
		叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	总叶绿素 Total chlorophyll content	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b		
丰试 88 Fengshi 88	CK	0.087 ± 0.005c	0.037 ± 0.005ab	1.993 ± 0.063c	2.373 ± 0.441c	14.553 ± 2.721d	0.580 ± 0.113c
	S1	0.119 ± 0.003b	0.033 ± 0.001b	2.244 ± 0.083b	3.638 ± 0.057a	33.926 ± 5.012d	1.207 ± 0.099b
	S2	0.115 ± 0.004b	0.040 ± 0.002a	2.343 ± 0.048b	2.920 ± 0.265b	64.521 ± 3.959c	1.163 ± 0.132b
	S3	0.125 ± 0.014b	0.035 ± 0.005ab	2.302 ± 0.281b	3.535 ± 0.076a	65.662 ± 7.942c	2.177 ± 0.486a
	S4	0.138 ± 0.003a	0.039 ± 0.001ab	2.739 ± 0.052a	3.498 ± 0.021a	106.670 ± 12.491b	1.827 ± 0.564a
	S5	0.117 ± 0.002b	0.034 ± 0.001b	2.290 ± 0.038b	3.406 ± 0.016a	130.448 ± 19.080a	1.945 ± 0.127a
	F 值 F-value	19.487***	1.992	10.849**	15.643***	41.260**	10.643***
沈单 16 Shendan 16	CK	0.036 ± 0.005f	0.01 ± 0.002d	0.640 ± 0.082d	3.631 ± 0.125b	27.087 ± 3.791e	1.145 ± 0.052b
	S1	0.051 ± 0.008e	0.014 ± 0.002d	0.973 ± 0.161c	3.579 ± 0.094b	58.177 ± 5.720d	1.180 ± 0.249b
	S2	0.077 ± 0.013c	0.022 ± 0.003c	1.444 ± 0.184b	3.566 ± 0.15b	112.712 ± 24.655c	0.846 ± 0.049c
	S3	0.114 ± 0.002b	0.033 ± 0.001ab	2.184 ± 0.080a	3.473 ± 0.038b	166.081 ± 15.573c	1.172 ± 0.086b
	S4	0.122 ± 0.001ab	0.035 ± 0.002a	2.367 ± 0.116a	3.527 ± 0.19b	150.620 ± 12.681b	1.217 ± 0.161b
	S5	0.129 ± 0.003a	0.029 ± 0.003b	2.278 ± 0.099a	4.51 ± 0.36a	208.893 ± 20.049a	1.548 ± 0.119a
	F 值 F-value	101.433***	58.804***	101.285**	12.974***	53.756**	7.839**
丰试 9713 Fengshi 9713	CK	0.107 ± 0.003c	0.029 ± 0.0009d	2.092 ± 0.059e	3.549 ± 0.016b	23.010 ± 3.981e	1.092 ± 0.113c
	S1	0.110 ± 0.002c	0.030 ± 0.0012d	2.164 ± 0.059de	3.615 ± 0.051a	51.994 ± 22.432d	1.819 ± 0.079b
	S2	0.111 ± 0.002c	0.032 ± 0.0008d	2.188 ± 0.052d	3.474 ± 0.032c	123.445 ± 25.600c	1.808 ± 0.197b
	S3	0.138 ± 0.001a	0.041 ± 0.0003b	2.633 ± 0.033b	3.389 ± 0.040d	126.040 ± 13.811b	2.289 ± 0.589ab
	S4	0.138 ± 0.002a	0.048 ± 0.0012a	2.829 ± 0.036a	2.863 ± 0.022e	216.215 ± 23.934a	2.439 ± 0.331a
	S5	0.12 ± 0.003b	0.035 ± 0.0005c	2.300 ± 0.051c	3.428 ± 0.017cd	162.836 ± 15.971b	2.057 ± 0.42ab
	F 值 F-value	49.774***	53.055***	107.348**	209.597***	57.917**	5.898**

## 2.4 污泥施用对玉米叶片脯氨酸含量的影响

在不同污泥施加量下, 3 个玉米品种叶片脯氨

酸含量表现出相同的变化趋势, 正常生长的玉米叶片游离脯氨酸含量比较低, 随着污泥施加量的增加,

玉米叶片中脯氨酸大量积累,呈现显著的浓度效应关系(表 4)。不同污泥施用量对 3 个玉米品种叶片脯氨酸含量的影响均达到较显著差异水平( $P < 0.01$ )。沈单 16 和丰试 9713 的各污泥施加量脯氨酸含量均显著高于对照。丰试 88 在污泥施加量为 S1 时脯氨酸含量与对照相比差异不显著,其它污泥施加量均显著高于对照。玉米丰试 88 和沈单 16 在最大污泥施加量时脯氨酸含量达到最大值,丰试 9713 在污泥施加量为 S4 时脯氨酸含量达到最大值,3 个玉米品种叶片最大脯氨酸含量与对照相比均增加近十倍。沈单 16 和丰试 9713 叶片的脯氨酸含量显著高于丰试 88。

### 2.5 污泥施用对玉米叶片丙二醛含量的影响

不同污泥施用量对丰试 88 叶片丙二醛含量的影响达到极显著差异水平( $P < 0.001$ ),对沈单 16 和丰试 9713 叶片丙二醛含量的影响达到较显著差异水平( $P < 0.01$ )(表 4)。丰试 88 在各污泥施加量时叶片丙二醛含量均显著高于对照,在污泥施加量为 S3、S4、S5 时玉米叶片丙二醛含量差异不显著,在污泥施加量为 S3 时叶片丙二醛含量达到最大值,与对照相比增幅为 275.3%。沈单 16 在污泥施加量为 S1、S3 和 S4 时叶片丙二醛含量与对照相比差异不显著,均显著高于 S2 处理时叶片丙二醛含量,在最

大污泥施加量时叶片丙二醛含量达到最大值,与对照相比增幅为 35.2%。丰试 9713 各污泥施加量时的叶片脯氨酸含量均显著高于对照,在污泥施加量为 S1、S2、S3、S5 时叶片脯氨酸含量之间差异不显著。丰试 9713 在污泥施加量为 S4 时叶片丙二醛含量达到最大值,与对照相比增幅为 88.3%。3 个玉米品种中丰试 88 叶片丙二醛含量与对照相比的增加量最大,沈单 16 增加量最小。

### 2.6 土壤重金属含量对玉米生理指标的影响

污泥混合土壤中 Cu、Pb、Zn 的含量与 3 个玉米品种的 3 种生理指标均呈现正相关关系(表 5)。土壤中 3 种重金属的含量与丰试 88 叶绿素总含量无显著相关性;土壤中 3 种重金属含量与沈单 16 的叶绿素总含量均呈现极显著相关性;土壤中 Cu 和 Pb 的含量与丰试 9713 叶绿素总含量无显著相关性,Zn 的含量与丰试 9713 叶绿素总含量呈显著相关性( $P < 0.05$ )。土壤中 3 种重金属含量与 3 个品种玉米叶片的脯氨酸均呈现极显著正相关关系( $P < 0.001$ )。土壤中 3 种重金属元素的含量与 3 个玉米品种丙二醛含量均呈现显著正相关性,其中 Zn、Pb 的含量与丰试 88 丙二醛含量达到了呈极显著相关性( $P < 0.001$ )。

表 5 土壤重金属含量与玉米叶绿素总含量、脯氨酸含量、丙二醛含量的相关系数

Table 5 The correlation coefficients among contents of heavy metals in the soil and chlorophyll, praline, MDA content in maize leaves

玉米品种 Varieties	生理指标 Physiological index	土壤中重金属含量 Heavy metals in the soil		
		Cu	Zn	Pb
丰试 88 Fengshi 88	叶绿素总含量 Chlorophyll content	0.447	0.384	0.281
	脯氨酸含量 Praline content	0.777***	0.718***	0.875***
	丙二醛含量 MDA content	0.688**	0.755***	0.760***
沈单 16 Shendan 16	叶绿素总含量 Chlorophyll content	0.825***	0.873***	0.953***
	脯氨酸含量 Praline content	0.955***	0.895***	0.896***
	丙二醛含量 MDA content	0.529*	0.595**	0.612**
丰试 9713 Fengshi 9713	叶绿素总含量 Chlorophyll content	0.382	0.470*	0.232
	脯氨酸含量 Praline content	0.909***	0.951***	0.960***
	丙二醛含量 MDA content	0.542*	0.606**	0.698**

### 3 结论与讨论

根据我国农用污泥中污染物控制标准(GB4284-84)<sup>[11]</sup>,在土壤 pH 值大于 6.5 条件下,农田施用污泥中污染物的最高容许含量 Pb 为 1 000 mg·kg<sup>-1</sup>,Cu 为 500 mg·kg<sup>-1</sup>,Zn 为 1 000 mg·kg<sup>-1</sup>,本研究供试污泥中 3 种重金属含量均低于限值。各施加量污泥混合土壤中 3 种重金属元素的含量均低于我国土壤环境质量二级标准(GB15618-1995)<sup>[10]</sup>中碱性土壤的限制性标准值,但相对土壤背景值大幅提升,Pb 的含量与对照含量相比增幅达到了近 12 倍,因此,如果对同一耕地多次施用污泥必须进行长期定位监测,研究污泥中重金属在土壤中的迁移转化行为以及在生物体内的富集状况。

丘锦荣等<sup>[12]</sup>认为污泥作为肥料种植玉米,玉米生长良好,且长势和产量明显优于对照和施用化肥的处理。本研究所设置的污泥施加浓度范围内,不同污泥处理对 3 个玉米品种生物量影响显著。污泥中充足的养分对玉米生物量的积累起到显著的促进作用,不同污泥处理 3 个玉米品种生物量均大于对照。不同污泥处理下丰试 88 生物量均高于沈单 16 和丰试 9713,这表明玉米的生长不仅与施加的污泥量等因素有关,而且与植物对养分需求及重金属等有害物质的耐性不同有很大的关系。

植物的光合作用是重要的代谢过程,其强弱对植物的生理生长及抗逆性具有十分重要的影响,叶绿素含量的高低在很大程度上反映了植株的生长状况和光合作用<sup>[13]</sup>。本研究表明污泥的施加显著影响了玉米叶片的光合作用过程,使玉米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,从玉米生物量的变化也证实了这一点。不同污泥处理对 3 个玉米品种叶绿素含量的影响表现出一致的规律,随着污泥处理浓度的增加其叶绿素总含量呈现先升后降的趋势,这可能是高污泥施加量时污泥中重金属等的污染物抑制了叶绿素生物合成途径中几种酶的活性,从而导致叶绿素含量的下降<sup>[14]</sup>。根据任安芝等<sup>[15]</sup>认为叶绿素 a/b 是叶片感受外界胁迫程度相对敏感的一个生理指标,逆境胁迫会引起植物叶片叶绿素 a/b 值减小。本研究中 3 个玉米品种中只有丰试 9713 叶绿素 a/b 值在污泥施加后与对照相比有较小幅度的降低,丰试 9713 的光合色素对污泥中有害物质的敏感性要大于其它两个品种。

脯氨酸是一种亲和性渗透调节物质,其在抗逆中的作用主要是保护细胞膜系统,维持胞内酶的结构,减少胞内蛋白质的降解,保护生物大分子的结构与稳定性,阻止氧自由基产生。脯氨酸积累是植物对逆境的一种生理适应<sup>[16]</sup>。本研究中,3 个玉米品种体内脯氨酸的含量随着污泥施加量的增加迅速升高,表明污泥施加量的增加使混合土壤中重金属等污染物迅速增加<sup>[17]</sup>,诱导了玉米体内自由基的产生并增强了玉米的抗逆防御体系,维持膜的稳定性,减轻植株所受的伤害,增强植物对胁迫的适应性,这与 Khatun<sup>[18]</sup>、魏学玲<sup>[19]</sup>等的观点相一致,这应该也是施污泥后虽然土壤中的污染物增加但并未使植物株高受到抑制的原因之一。土壤中 3 种重金属浓度与玉米叶片中脯氨酸含量均呈极显著正相关,说明重金属是诱导脯氨酸含量增加的重要污染物之一。在本研究污泥施用范围内玉米叶片脯氨酸含量随污泥施加量的加大呈现线性递增趋势,但并未出现阈值,这表明本研究污泥施用范围内污泥中污染物尚未对玉米叶片的生理生化机能产生较大伤害,仍在玉米自身抗逆防御体系调节范围之内。

丙二醛是植物在逆境胁迫下细胞质膜过氧化而产生的物质,它可以与植物体内的大分子物质作用,形成不溶性的化合物沉积,干扰细胞的正常生命活动,其含量的多少常被用作植物细胞膜质损伤程度的指标<sup>[20-22]</sup>。本研究表明随着污泥施加量的加大以及土壤中重金属含量的增加,3 个玉米品种叶片丙二醛含量都呈上升趋势,反映了植物在污泥中重金属等多种有害物质形成的胁迫条件下膜脂过氧化作用加强,细胞膜受到一定程度的损伤。随着胁迫的加剧,3 个玉米品种体内的丙二醛含量都呈上升趋势,但是上升幅度并不一致,不同品种玉米对污染物的抗性存在差异。沈单 16 叶片丙二醛的含量与对照相比上升幅度小,说明污泥中有害物质并未对其叶片细胞膜质产生较大的损伤,3 个玉米品种中的沈单 16 更适合在西北地区城市污泥施用土壤中栽种。

选择高等植物的生理生长指标进行土壤污染效应的研究,是从生态学角度衡量土壤环境质量的重要方法,是对化学法评价土壤质量与土壤污染的重要补充<sup>[23-24]</sup>。本研究中污泥施用对玉米株高、叶绿素含量、脯氨酸含量和丙二醛含量均有显著影响,4 种指标值与对照相比有不同幅度的增加。叶绿素

含量和株高的增加表明污泥中充足的养分对植物的生长有促进作用,丙二醛含量的增加表明植物膜脂过氧化作用加强,细胞膜受到一定程度的损伤,而脯氨酸含量的增加表明植物产生了抗逆防御体系,减轻植株所受的伤害,增强植物对胁迫的适应性。综合考虑兰州市城市污泥不同施加量对玉米生理生长的影响,玉米在低于 S4 的污泥施用范围内对污泥的施加表现出较强的适应能力及耐受能力。污泥对作物的影响还与温湿度、光照、水分、营养元素和病虫害等密切相关。因此,本试验还有待在大田中进一步研究。

#### 参 考 文 献:

- [1] 张晓琳,鄂 勇,胡振帮,等.污泥施田后土壤和玉米植株中重金属分布特征[J].土壤通报,2010,41(2):479-484.
- [2] 陈同斌,郑国砥,高 定,等.城市污泥堆肥处理及其产业化发展中的几个关键问题[J].中国给水排水,2009,25(9):104-108.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 李金红,何群彪.欧洲污泥处理处置概况[J].中国给水排水,2005,21(1):101-103.
- [6] 张百平,张雪芹,郑 度.西北干旱区不宜作为我国耕地后备资源基地[J].干旱区研究,2010,27(1):1-5.
- [7] 中国土壤学会农业化学专业委员会.土壤和农业化学常规分析方法[M].北京:科学出版社,1983:67-116.
- [8] 李得孝,郭月霞,员海燕,等.玉米叶绿素含量测定方法研究[J].中国农学通报,2005,21(6):153-155.
- [9] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000:258-261.
- [10] 国家环境保护局.GB15618-1995.土壤环境质量标准[S].北京:中国标准出版社,1995.
- [11] 农牧渔业部环境保护科研监测所.GB4284-84.农用污泥中污染物控制标准[S].北京:中国标准出版社,1984.
- [12] 丘锦荣,刘 雯,郭晓方,等.植物处理后的城市污泥农用对玉米生长的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(5):990-994.
- [13] 潘慧云,李小路,徐小花,等.甲磺隆对沉水植物伊乐藻的生理生态效应研究[J].环境科学,2008,29(7):1844-1848.
- [14] 崔 玮,谢宗平,马嘉琦,等.镉锌离子对高羊茅幼苗生理特性的影响[J].农业环境科学学报,2004,23(6):1093-1096.
- [15] 任安芝,高玉葆,刘 爽.铬、镉、铅胁迫对青菜叶片几种生理生化指标的影响[J].应用与环境生物学报,2000,6(2):112-116.
- [16] 张义贤,李晓科.镉、铅及其复合污染对大麦幼苗部分生理指标的影响[J].植物研究,2008,28(1):43-53.
- [17] 梁丽娜,黄雅曦,杨合法,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.
- [18] Khatun S, Babar A M, Hahn E J, et al. Copper toxicity in *Withania somnifera*: growth and antioxidant enzymes responses of in vitro grown plants[J]. Environ Exp Bot, 2008, 64:279-285.
- [19] 魏学玲,史如霞,杨颖丽,等.Cd<sup>2+</sup>胁迫对小麦幼苗生理生化特性的影响[J].西北植物学报,2002,22(6):1372-1376.
- [20] Lin R, Wang X, Luo Y, et al. Effects of soil cadmium on growth, oxidative stress and antioxidant system in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.)[J]. Chemosphere, 2007, 69:89-98.
- [21] 郭 智,王 涛,奥岩松.镉对龙葵幼苗生长和生理指标的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(4):755-760.
- [22] 刘周莉,何兴元,陈 玮.镉胁迫对金银花生理生态特征的影响[J].应用生态学报,2009,20(1):40-44.
- [23] 白莉萍,宋金洪,辛 涛,等.施用城市污泥对小叶黄杨光合特性和生长的影响[J].应用生态学报,2010,21(4):1026-1030.
- [24] Abdelbasset L, Maria A L, Ahmed D, et al. Effect of municipal solid waste compost and sewage sludge use on wheat (*Triticum durum*): growth, heavy metal accumulation, and antioxidant activity[J]. Journal Science Food Agriculture, 2010, 90:965-971.