

污泥施用对土壤及小麦生理特性的影响

戴亮^{1,2}, 任珺^{1,2*}, 陶玲¹, 李华¹

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

摘要:以兰州市安宁区污水处理厂污泥为研究对象,采用盆栽方法研究污泥施用后对土壤 pH 值的影响,对土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 含量的影响以及对小麦叶片叶绿素含量和脯氨酸含量特性的影响。结果表明,污泥施用后土壤的 pH 值显著下降,并呈递减趋势。不同污泥施加量土壤中 3 种重金属元素的含量均远低于我国土壤环境质量二级标准(GB 15618—1995)中碱性土壤的限制性标准值。3 种小麦叶片的叶绿素总含量随污泥浓度的增加而增加,污泥在混配土壤中的干重比为 15% 时 3 种小麦均达到最大值,随着污泥施加量的进一步加大出现下降。污泥施用后 3 种小麦叶绿素 a/b 值与对照相比无显著变化,小麦叶片中脯氨酸含量比对照有大幅的增加。低污泥施加量时(5%、10% 和 15%),3 种小麦叶片中脯氨酸含量随施加量增加而增加,但高污泥施加量时(25% 和 35%)的脯氨酸含量无显著增加,污泥中污染物胁迫超过小麦耐受限值后,小麦生理代谢出现反常。土壤中 3 种重金属元素的含量与 3 种小麦体内脯氨酸含量均呈极显著正相关关系,土壤的 pH 值与 3 种小麦的叶绿素总含量和脯氨酸含量均呈负相关关系。综合考虑污泥施用对小麦生理特性的影响,对小麦的耕种土壤中一次性施用污泥时,污泥在混配土壤中的干重比应限量在 15% 以下。

关键词:污泥;土地利用;小麦;生理指标;重金属

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)02-0362-07

Effects of Sewage Sludge Application on Soil and Physiological Property of *Triticum Aestivum*

DAI Liang^{1,2}, REN Jun^{1,2*}, TAO Ling¹, LI Hua¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Engineering Research Center for Cold and Arid Regions Water Resource Comprehensive Utilization, Ministry of Education, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The application of sewage sludge on agricultural soils is a promising disposal and utilizable method and this has been shown to improve soil properties and increase plant productivity. This paper took the sewage sludge in wastewater treatment plant of Anning District in Lanzhou as research subject and studied the effects of land utilization on pH value, the heavy metal content in soil, chlorophyll and proline content in *Triticum aestivum* leaves by using pot scale experiments. The results showed that pH value in the soil declined significantly with the increase of the sewage sludge application. The content of Pb, Cu, Zn in the soil was far below the national standard of environmental quality standards for soils for Grade II (GB 1518—1995). The amount of total chlorophyll in these three kinds of *Triticum aestivum* increased with the increase of sewage sludge application, rose to the maximum as the ratio of sludge in the mixed soil of dry weight becomes 15%, and decreased with a further increase of sewage sludge. Compared with the control, the a/b value in chlorophyll showed little change, whereas the content of proline in *Triticum aestivum* leaves showed significant increase after the application of sewage sludge. While the content of proline in *Triticum aestivum* increased with the increase of sewage sludge in low land application of sewage sludge (the ratio of sludge in the mixed soil of dry weight was 5%, 10% and 15%), there was no significant increase in the content in high land application of sewage sludge (the ratio of sludge in the mixed soil of dry weight was 25% and 35%). The physiological metabolism of *Triticum aestivum* showed abnormality as the stress of pollutants from sludge was beyond the tolerance of *Triticum aestivum*. The content of Pb, Cu, Zn in the soil had significantly positive correlation with the content of proline in the three kinds of *Triticum aestivum* leaves, whereas pH value in the soil was negatively correlated with the content of chlorophyll and proline. The study took the effects of sewage sludge application on physiological property of *Triticum aes-*

收稿日期: 2011-07-15

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划(IRT0966); 国家自然科学基金(30970490)

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

* 通讯作者: 任珺 E-mail: renjun@mail.lzjtu.cn

tivum into consideration, and concluded that the ratio of sludge in the mixed soil of dry weight should be lower than 15%.

Keywords: sludge; application in the soil; *Triticum aestivum*; physiological property; heavy metal

随着我国工业生产的发展和城市人口的剧增,工业废水与生活污水的排放量日益增多,城市污泥的产量也迅速增加^[1]。污泥中含有大量的有害物质,如重金属、细菌、各种寄生虫卵、大量的病原微生物等,如果处理不当容易形成“二次污染”,城市污泥已成为许多城市面临的主要环境问题之一^[2-3]。如何科学合理地处置城市污泥已成为当前亟待解决的生态环境问题^[4-5]。目前,国际上污泥处置的主要方法有填埋、焚烧和土地利用等,其中污泥填埋和焚烧由于环境压力或费用昂贵,已被逐渐减少或禁止使用。由于污泥中含有丰富的有益于植物生长的养分和大量的有机物质,以及基于经济和环境的压力以及资源化考虑,污泥的土地利用已成为国际上污泥处置的重要途径之一^[3,6-7]。欧美国家超过 40%的污泥施于农田^[8-9],我国污泥处理利用技术还比较落后,污泥土地利用率与国外相比也有一定的差距。污泥的土地资源化利用是将污泥变废为宝,使其具有环境效益、生态效益、社会效益和经济效益,是城市可持续发展与污泥处理处置的必然要求和发展趋势^[2,10-11]。对于我国这样一个荒漠化严重且拥有相当大的中低产土壤面积的农业大国,污泥的土地利用特别是污泥的农用具有重要的现实意义^[12]。

小麦是世界上最重要的粮食作物之一,全世界约有一半以上的人口以小麦作为主要粮食,其产量和品质直接影响着人民饮食水平的提高^[13]。污泥中含有重金属等有毒有害物质,土地利用后污泥中重金属将对农作物的生理系统产生显著的影响^[14],因此研究污泥施用对小麦的生理生长的影响具有重要的实际意义。目前,有关污泥土地利用对农作物影响的研究多集中在对农作物的生长影响和富集效应方面,而且研究地域多集中在我国东部发达地区,对于西北地区污泥土地利用后对农作物生理系统的影响研究很少。本试验选择兰州市安宁区污水处理厂的脱水污泥,通过盆栽

试验,分析污泥施用后对土壤中重金属含量和 pH 值的影响以及对小麦生理指标的影响,并采用相关分析法对土壤重金属含量、pH 值与小麦叶绿素含量、脯氨酸含量的相关性进行分析,旨在为西北地区科学合理利用污泥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究材料

污泥采自兰州市安宁区污水处理厂的脱水污泥,该厂污水主要来源于城市居民生活排放以及工业废水排放。于 2009 年 9 月采集污泥样品,置于室内通风处自然风干,用木槌捶碎、粉碎、过 100 目筛,用密实袋装好备用^[15]。试验土壤采自兰州市花卉培养基地。本试验选择城市污泥中含量较高的重金属元素 Cu、Zn、Pb 进行研究^[16],供试土壤与污泥的性质见表 1。供试作物为小麦,种子购买于甘肃省农科院,品种选择在西北地区大面积栽种的永良 15 号 (*Triticum aestivum* var. yongliang-15)、宁春 4 号 (*Triticum aestivum* var. ningchun-4) 和陇春 23 号 (*Triticum aestivum* var. longchun-23)。

1.2 研究方法

测定土壤 pH 值采用电位法(水土比为 2.5:1)。土壤和污泥有机质含量采用重铬酸钾法^[17]。土壤全氮采用半微量凯氏定氮法^[17]。土壤全磷采用三酸(硝酸-高氯酸-氢氟酸)消煮,钼锑抗比色法^[17]。污泥和土壤中的 Cu、Zn、Pb 的全量测定采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 消煮-电感耦合等离子发射仪(ICP-AES)测定法。

本研究采用盆栽试验。试验设有 6 种污泥施用量,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,每盆基质重 4.0 kg,6 种施用量每盆施用的污泥干重分别为 0、0.12、0.24、0.37、0.65 kg 及 0.95 kg。每一

表 1 供试污泥和土壤养分及重金属含量

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

项目	有机质/%	全氮/%	全磷/%	pH	重金属/mg·kg ⁻¹		
					Cu	Zn	Pb
污泥	28.6±1.65	1.31±0.17	1.54±0.09	6.82±0.34	354.11±29.12	420.65±32.02	157.84±24.76
土壤	2.03±0.18	0.16±0.02	0.15±0.04	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。

处理重复3次。污泥按设计浓度与土壤充分混均,装入直径为30 cm,高度为25 cm的塑料盆中。混合土壤平衡1个月后栽种小麦。每盆播种30粒,植物生长120 d后,对其新鲜叶片迅速采样进行指标测定。

叶绿素含量的测定采用丙酮乙醇混合液法^[18],取新鲜叶片0.5 g剪碎并且装入三角瓶中,加入1:1乙醇丙酮混合液50 mL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。

$$\text{叶绿素 a (mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = (12.7D_{663} - 2.69D_{645})V / 1\,000 \cdot W \quad (1)$$

$$\text{叶绿素 b (mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = (22.9D_{645} - 4.68D_{663})V / 1\,000 \cdot W \quad (2)$$

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

脯氨酸含量测定采用磺基水杨酸法^[19],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,加入冰醋酸2 mL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⁻¹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($Y=0.0512X+0.0132$)计算样品中脯氨酸含量。

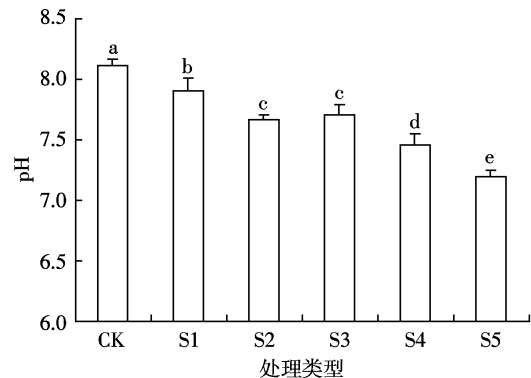
用STATISTICA (Version 7.0)和Microsoft Excel软件对数据进行单因素方差分析、相关性分析并用Duncan氏法进行平均值间的多重比较。

2 结果与分析

2.1 污泥施用对土壤 pH 值的影响

不同污泥施加量对土壤 pH 值的影响达到了极显著差异水平($F=58.78, P<0.001$)。对照土壤 pH 值超

过8,土壤偏碱性(图1)。对照土壤 pH 值与各污泥施加量土壤 pH 值之间均差异显著。随着污泥施加量的加大,土壤 pH 值显著降低。在污泥施加量为 S2 和 S3 时土壤 pH 值之间差异不显著,其他各施加量之间土壤 pH 值均差异显著。污泥施用量为 S5 时土壤 pH 值达到最低,与对照相比 pH 值下降了 0.92。



不同字母表示处理间差异显著($P<0.01$)。下同

图1 污泥施用对土壤 pH 的影响

Figure 1 Effect of sewage sludge application on pH value in the soil

2.2 污泥施用对土壤重金属含量的影响

不同污泥施加量对土壤中重金属 Cu、Pb、Zn 含量的影响均达到极显著差异水平(Cu 含量: $F=649.12, P<0.001$; Zn 含量: $F=1\,377.62, P<0.001$; Pb 含量: $F=85.43, P<0.001$)。污泥施用后土壤中 Cu、Zn、Pb 的含量均显著高于对照,并随着污泥施加量的增加而增加(图2)。污泥混合土壤中 Cu 的含量在施加量为 S2 和 S3 时无显著差异性,但均显著高于对照和 S1 施加量。混合土壤中 Zn 含量在施加量为 S1 和 S2 时差异不显著,但均显著高于对照,在污泥施加量为 S3 和 S4 条件下,混合土壤中 Zn 含量之间差异不显著,但显著高于对照和 S1、S2 施加量。土壤中 Pb 的含量在施加量为 S2 时显著高于 S1 施加量和对照,但是低于

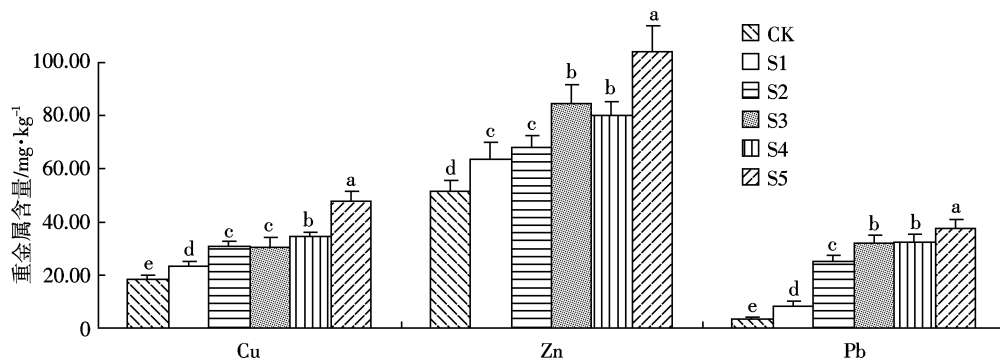


图2 污泥施用对土壤重金属含量的影响

Figure 2 Effect of sewage sludge application on the concentration of heavy metals in the soil

S3、S4 和 S5 施加量,在施加量为 S3 和 S4 时差异不显著。在污泥最大施用量 S5 时土壤中 3 种重金属元素的含量均达到最大值,显著高于对照和其他各施加量。3 种重金属在污泥混合土壤中含量的大小顺序为:Zn>Cu>Pb。

2.3 污泥施用对 3 种小麦叶片叶绿素含量的影响

不同小麦品种在对照时叶绿素总含量之间差异不显著,不同污泥施用量对 3 种小麦叶片叶绿素总含量的影响均达到了极显著差异水平($P<0.001$)。在施用量为 S1 和 S3 时差异显著($P<0.05$),在施用量为 S2 和 S4 时差异较显著($P<0.01$),在施用量为 S5 时差异极显著($P<0.001$)(表 2)。陇春 23 号在不同污泥施用量时的叶绿素总含量均显著高于其他两个品种。不同小麦品种在污泥施用量为 S2 时叶绿素 a/b 值差异显著($P<0.05$),在其他各施用量时差异均不显著。宁春 4 号的叶绿素总含量在最大污泥施加量 S5 时与对照相比差异不显著,其他污泥施加量的叶绿素总含量均显著高于对照。陇春 23 号和永良 15 号在各污泥施加量时的叶绿素总含量均显著高于对照。不同污泥施加量对宁春 4 号和永良 15 号叶绿素 a/b 值的影响不显著,对小麦陇春 23 号叶绿素 a/b 值的影响一般显著($P<0.05$)。陇春 23 号在污泥施加量为 S5 时叶片叶绿素 a/b 值显著高于对照,其他施加量时叶片叶绿素 a/b 值与对照相比差异均不显著。

2.4 污泥施用对 3 种小麦叶片脯氨酸含量的影响

永良 15 号叶片脯氨酸含量高于其他两种小麦(表 3)。在污泥施加量为 S3、S4 和 S5 时,3 个品种小麦叶片脯氨酸含量之间达极显著差异水平($P<0.001$);在污泥施用量为 S2 时,种间脯氨酸含量差异不显著。不同污泥施用量对 3 种小麦叶片脯氨酸含量的影响均达到了极显著差异水平($P<0.001$)。污泥施加后 3

表 3 污泥施用对小麦叶片脯氨酸的影响($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)

Table 3 Effect of sewage sludge application on content of proline in *Triticum aestivum* leaves($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)

处理	宁春 4 号	陇春 23 号	永良 15 号	F 值
CK	50.20±6.40dB	54.92±6.67cB	69.08±6.18dA	7.03*
S1	244.86±27.01cA	152.41±20.04bB	262.76±23.97cA	18.50**
S2	334.21±70.14b	265.53±24.79a	392.48±52.94b	4.36
S3	353.74±34.99aB	298.40±9.70aC	518.95±29.60aA	53.99***
S4	405.50±46.51aB	306.05±19.55aC	573.80±32.25aA	45.97***
S5	378.32±42.57aB	295.31±5.76aB	587.63±70.90aA	29.72***
F 值	120.76***	28.62***	72.27***	

种小麦叶片中脯氨酸含量与对照相比有大幅的增加,并随着污泥施加量的增加而迅速增加。3 种小麦在各污泥处理下叶片中脯氨酸的含量均显著高于对照。宁春 4 号和永良 15 号的脯氨酸含量在污泥施加量 S3、S4、S5 之间的差异均不显著,但均显著高于 S2 和 S1。陇春 23 号的脯氨酸含量在污泥施加量 S2、S3、S4、S5 之间无显著性差异。

2.5 土壤重金属含量和 pH 值对小麦生理指标的影响

对土壤中 3 种重金属的含量及 pH 值与小麦体内的叶绿素总含量和脯氨酸含量进行相关性分析表明(表 4),污泥混合土壤中 3 种重金属元素的含量及 pH 值对宁春 4 号的叶绿素总含量均无显著相关关系。土壤中 3 种重金属元素对 3 种小麦脯氨酸含量的影响均达到极显著正相关关系($P<0.001$)。土壤中 Cu、Zn 的含量与陇春 23 号的叶绿素总含量呈现较显著正相关关系($P<0.01$),土壤中 Pb 的含量与陇春 23 号的叶绿素总含量呈现极显著正相关关系($P<0.001$)。土壤中 3 种重金属元素与永良 15 号的叶绿素总含量均具有极显著正相关关系($P<0.001$)。各污泥处理土壤的 pH 值与 3 种小麦的叶绿素总含量和

表 2 污泥施用对小麦叶片叶绿素含量的影响($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)

Table 2 Effect of sewage sludge application on chlorophyll content in *Triticum aestivum* leaves($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)

处理	叶绿素总含量				叶绿素 a/b			
	宁春 4 号	陇春 23 号	永良 15 号	F 值	宁春 4 号	陇春 23 号	永良 15 号	F 值
CK	2.21±0.24c	2.52±0.12d	2.20±0.22c	2.59	13.60±0.25	13.67±2.88a	12.74±0.04	0.29
S1	2.69±0.15bAB	2.97±0.12cA	2.54±0.21bB	5.25*	15.11±5.51	11.80±0.99a	12.72±2.31	0.72
S2	2.65±0.23bB	3.44±0.27bA	2.62±0.07bB	15.06**	13.56±0.28A	12.71±0.23aB	12.92±0.37B	6.63*
S3	3.42±0.15aB	3.88±0.19aA	3.38±0.17aB	8.11*	13.32±2.82	12.13±2.00a	11.16±1.84	0.69
S4	3.06±0.23aB	3.72±0.15abA	3.33±0.05aB	12.97**	13.00±0.15	12.15±0.87a	11.34±2.24	1.07
S5	2.04±0.22cB	3.50±0.20bA	3.26±0.18aA	55.22***	13.98±0.24	19.40±5.76b	12.69±0.24	3.43
F 值	19.32***	22.99***	31.26***		0.25	3.19*	0.8	

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, $P=0.05$),同一行中不同大写字母表示差异显著。*代表 $P<0.05$ 水平;**代表 $P<0.01$ 水平;***代表 $P<0.001$ 水平,下同。

表4 土壤pH值、重金属含量与小麦叶绿素总含量、脯氨酸含量的相关系数

Table 4 The correlation index between pH value, content of heavy metals in the soil and content of chlorophyll, proline in

		土壤中重金属含量			pH 值
小麦品种	生理指标	Cu	Zn	Pb	
宁春4号	叶绿素总含量	-0.134	0.030	0.255	-0.086
	脯氨酸含量	0.790***	0.806***	0.953***	-0.833***
陇春23号	叶绿素总含量	0.632**	0.705**	0.869***	-0.640**
	脯氨酸含量	0.759***	0.760***	0.875***	-0.817***
永良15号	叶绿素总含量	0.731***	0.836***	0.879***	-0.751***
	脯氨酸含量	0.858***	0.883***	0.957***	-0.887***

脯氨酸含量均呈负相关关系。土壤pH值与陇春23号的叶绿素含量呈较显著的负相关($P<0.01$),与永良15号的叶绿素含量呈现极显著负相关关系($P<0.001$)。土壤的pH值与3种小麦叶片脯氨酸含量均呈现极显著负相关关系($P<0.001$)。

3 讨论

土壤pH对土壤肥力及植物生长影响很大,会影响植物细胞内的多种代谢活动。根据李清芳等的研究小麦种子萌发和幼苗生长的最适pH值是6.5^[20]。pH值小于6或大于7,种子萌发速度将减慢,苗期蒸腾强度、光合速率、根系活力、叶绿素含量降低,幼苗生长速度变慢,进而造成小麦产量、品质的降低。本研究表明,不同污泥施用量土壤pH值均显著低于对照,并随着污泥施加量的增加而降低,呈显著递减趋势。在西北地区进行污泥的土地利用将有效降低土壤的pH值,对小麦的生长有利。但是长期施用污泥将可能使土壤酸化,而且土壤pH值的降低会使土壤中溶解性金属离子浓度升高,形成土壤重金属污染^[21],对农作物的生长及人类的健康形成潜在威胁。因此,农田如果长期大量的施用污泥,必须进行长期定位监测。

污泥中重金属含量是土壤背景值的几倍到几十倍,土地利用后,污泥中有毒有害的重金属也随之进入土壤环境,改变了土壤环境中原有重金属含量^[22]。我国对农用污泥中重金属有严格的限制,我国农用污泥中污染物控制标准(GB 4284—1984)对农用污泥在中性和碱性土壤上的重金属Cu、Zn、Pb的限制性标准值分别为500、1 000、1 000 mg·kg⁻¹,本次试验采集的污泥中Cu、Zn、Pb的含量均不超过该标准的限值。污泥混合土壤中3种重金属元素的含量也均远低于

我国土壤环境质量二级标准(GB 15618—1995)中碱性土壤的限制性标准值。污泥施用后土壤中Cu、Zn、Pb的含量与污泥施加量呈显著线性关系,随污泥施用量的增加而增加。

叶绿素含量是植物重要的生理指标,其含量的多少直接影响植物正常的光合作用甚至新陈代谢。叶绿素含量的变化,既可反映植物叶片光合作用功能的强弱,也可用以表征逆境胁迫下植物组织、器官的衰老状况^[23]。本研究表明,3种小麦的叶绿素总含量随污泥浓度的增加而增加,在污泥用量为S3时达到最大值,并随着污泥施加量的进一步加大出现反弹下降。污泥的施用对小麦叶片叶绿素含量有着重要影响,在污泥施加量为S1、S2和S3时,污泥中充足的养分对小麦叶绿素的含量起显著的促进作用。在高污泥施加量时(S4、S5),虽然污泥中营养物质增加但污泥中有害物质也在增加,所以叶绿素的含量相对S3处理时有所下降。叶绿素a/b是叶片感受重金属损害程度相对敏感的一个生理指标^[24],重金属逆境胁迫会引起植物叶片叶绿素a与叶绿素b的比值减小。施用污泥后3种小麦叶绿素a/b值与对照相比并没有显著变化,污泥的施加并未引起小麦叶片叶绿素的损伤,土壤重金属含量与小麦叶绿素总含量呈现正相关关系也能证明这一点,这可能与混合土壤中的重金属元素含量处于较低水平有关。不同污泥施用量土壤的pH值与3种小麦的叶绿素总含量均呈负相关关系,这表明碱性土壤施用污泥使土壤pH值降低将有利于植物的生长,这与李清芳等^[20]的研究一致。

脯氨酸是植物体内一种重要的亲和性渗透调节物,在逆境中的主要作用是调节细胞渗透平衡和增加蛋白质的可溶性,保护生物大分子的结构与稳定性和阻止氧自由基产生^[25]。本研究中,污泥施加后3种小麦叶片中脯氨酸含量比对照有大幅的增加,低污泥施加量时,3种小麦叶片中脯氨酸含量随施加量增加而增加,但污泥施加量为S3、S4和S5时的脯氨酸含量之间无显著差异,这说明脯氨酸含量增加到一定程度时再无显著增加。污泥施用后,污泥中有毒有害物质如高盐分、重金属等随之进入土壤环境^[26],对小麦的生理生长产生重要影响,而作为细胞质的渗透调节物质的游离脯氨酸的浓度升高,在一定程度上增强了小麦对污泥中高盐分、重金属等污染物的抗性,减轻植株所受的伤害,是小麦对逆境的一种生理适应。脯氨酸的积累能部分地缓解因污泥中污染物胁迫引起的自由基和过氧化物对植物的伤害,但小麦体内脯氨

酸含量增加到一定程度将不会增加甚至出现下降,表明植物通过代谢变化进行自我调节是有一定限度的,污泥中污染物胁迫超过小麦耐受限值后,小麦生理代谢将出现反常,这与汤华等^[27]的研究一致。从小麦叶片脯氨酸含量随污泥施加量的变化情况可知,污泥的施用量应考虑小麦生理特性的变化,污泥在混配土壤中的干重比不应超过15%。土壤3种重金属元素含量与小麦体内脯氨酸含量呈正相关关系,土壤的pH值与小麦的脯氨酸含量呈负相关关系,表明随着污泥施加量的加大,土壤的pH值下降,土壤重金属总量和溶解性金属离子浓度均显著增加,这对小麦脯氨酸含量有着重要影响,重金属是污泥中重要污染物之一。

4 结论

(1)不同污泥施用量土壤pH值均显著低于对照,并随着污泥施加量的增加而呈递减趋势。污泥施用后土壤中Cu、Zn、Pb的含量显著增加,但土壤中3种重金属含量均不超过我国土壤环境质量二级标准(GB 15618—1995)中碱性土壤的限制性标准值。

(2)3种小麦叶绿素总含量随污泥施加量的增加均呈先升后降趋势。污泥施用后3种小麦叶绿素a/b值与对照相比无显著变化。污泥施用后3种小麦叶片中脯氨酸含量比对照有大幅增加,但在污泥干重比超过15%后小麦脯氨酸含量再无显著增加,污泥中污染物胁迫超过小麦耐受限值后小麦生理代谢出现反常。污泥施用后土壤pH值与小麦脯氨酸含量及叶绿素总含量呈负相关关系,3种重金属含量与小麦脯氨酸含量及叶绿素总含量呈正相关关系。

(3)综合考虑不同污泥施用量对小麦生理特性的影响,在对小麦的耕种土壤中一次性施用污泥时,污泥在混配土壤中的干重比应限量在15%以下。

参考文献:

- [1] 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.
CHEN Tong-bin, ZHEN Guo-di, GAO Ding, et al. Key problems in municipal sludge composting and its industrialization process[J]. *China Water & Waste Water*, 2009, 25(9): 104-108.
- [2] 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.
MO Ce-hui, WU Qi-tang, CAI Quan-ying, et al. Utilization of municipal sludge in agriculture and sustainable development[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(1): 157-160.
- [3] 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.
BAI Li-ping, SONG Jin-hong, XIN Tao, et al. Effects of sewage sludge application on leaf photosynthesis and plant growth of *Buxus microphylla*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4): 1026-1030.
- [4] Singh R P, Agrawal M. Effects of swage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of *Beta vulgaris* plants[J]. *Chemosphere*, 2007, 67: 2229-2240.
- [5] 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.
QIAO Xian-liang, LUO Yong-ming, WU Sheng-chun. Application of sludge on land and its environmental effects[J]. *Soils*, 2000, 32(2): 79-85.
- [6] 晋王强,南忠仁,王胜利,等.兰州市城市污水处理厂污泥中重金属形态分布特征与潜在生态风险评价[J].农业环境科学学报,2010,29(6):1211-1216.
JIN Wang-qiang, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, et al. Fractionation and environmental assessment of heavy metals in the sludge from Lanzhou municipal wastewater treatment plants, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6): 1211-1216.
- [7] 周立祥,胡嵩堂,戈乃珍,等.城市污泥土地利用研究[J].生态学报,1999,19(2):185-193.
ZHOU Li-xiang, HU Ai-tang, GE Nai-fen, et al. Study on utilization of municipal sewage sludge in farmland and forest land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 185-193.
- [8] Rodrigo S C, Robert E W, Anthony J W. Effect of compost treatment of sewage sludge on nitrogen behavior in two soils[J]. *Waste Management*, 2006, 26: 614-619.
- [9] Fytli D, Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006, 5: 1-25.
- [10] 马娜,陈玲,何培松,等.城市污泥资源化利用研究[J].生态学杂志,2004,23(1):86-89.
MA Na, CHEN Ling, HE Pei-song, et al. Study on resource reuse of municipal sewage sludge[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 86-89.
- [11] 赵庆祥.污泥资源化技术[M].北京:化学工业出版社,2002.
ZHAO Qing-xiang. The sludge resource technology[M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2002.
- [12] 吴吉夫,王淑坤,臧树良.城市污水处理厂污泥的有效利用和相关的环境问题研究[J].辽宁大学学报,2002,29(1):90-92.
WU Ji-fu, WANG Shu-kun, ZANG Shu-liang. Study on reusing of municipal sewage sludge and the related environmental impact[J]. *Journal of Liaoning University*, 2002, 29(1): 90-92.
- [13] 邵云,姜丽娜,李向力,等.五种重金属在小麦植株不同器官中的分布特征[J].生态环境,2005,14(2):204-207.
SHAO Yun, JIANG Li-na, LI Xiang-li, et al. Distribution of five heavy metals in different organs of wheat[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14(2): 204-207.
- [14] 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: 507-514.

- [15] 赵晓莉, 徐德福, 李泽宏, 等. 城市污泥的土地利用对黑麦草理化指标和品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29:59-63.
ZHAO Xiao-li, XU De-fu, LI Ze-hong, et al. Influence of municipal sludge land application to ryegrass physical and chemical properties and quality[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29:59-63.
- [16] 周东兴, 魏丹, Kacatrkob B A. 城市污泥及其堆肥对土壤重金属积累的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(4):976-980.
ZHOU Dong-xing, WEI Dan, Kacatrkob B A. The effect of sewage sludge and its compost on the accumulation of heavy metals in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4):976-980.
- [17] 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.
Agro-chemistry. Professional Committee in Soil Science Society of China. General analytical method of soil and agro-chemistry [M]. Beijing: Science Press, 1983:67-116.
- [18] 李得孝, 侯万伟, 员海燕. 玉米叶片叶绿素快速浸提方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(11):65-67.
LI De-xiao, HOU Wan-wei, YUAN Hai-yan. Fast-soaking methods of chlorophyll from maize leaf [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2006, 34(11):65-67.
- [19] 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.
LI He-sheng. Plant physiology and biochemistry experiment principle and technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000:258-261.
- [20] 李清芳, 辛天蓉, 马成仓, 等. pH 值对小麦种子萌发和幼苗生长代谢的影响[J]. 安徽农业科学, 2003, 31(2):185-187.
LI Qing-fang, XIN Tian-rong, MA Cheng-cang, et al. Effect of pH value on wheat seed germination and seedlings growth and metabolism[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2003, 31(2):185-187.
- [21] 蔡全英, 莫测辉, 吴启堂, 等. 化学方法降低城市污泥的重金属含量及其前景分析[J]. 土壤与环境, 1999, 8(4):309-313.
CAI Quan-ying, MO Ce-hui, WU Qi-tang, et al. Chemical method and its prospect for heavy metal removal from municipal sludge[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 1999, 8(4):309-313.
- [22] 黄庆, 林小明, 柯玉诗, 等. 污泥农用对药用植物紫花茉莉品质和土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):193-196.
HUANG Qing, LIN Xiao-ming, KE Yu-shi, et al. Effects of agricultural utilization of sewage sludge compost on the officinal quality of *Mirabilis jalapa* L. and soil environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):193-196.
- [23] 李铮铮, 伍钧, 唐亚, 等. 铅、锌及其交互作用对鱼腥草叶绿素含量及抗氧化酶系统的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(12):5441-5446.
LI Zheng-zheng, WU Jun, TANG Ya, et al. Effect of Pb, Zn and their interactions on the chlorophyll content and antioxidant enzyme systems of *Houttuynia cordata* Thunb[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12):5441-5446.
- [24] 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.
REN An-zhi, GAO Yu-bao, LIU Shuang. Effects of Cr, Cd and Pb on free proline content etc in leaves of *Brassica chinensis* L. [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2000, 6(2):112-116.
- [25] 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.
ZHANG Yi-xian, LI Xiao-ke. Effects of Cd, Pb and their combined pollution on physiological indexes in leaf of the *hordeum vulgare* seedling[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2008, 28(1):43-53.
- [26] 蔡红, 陈同斌, 高定, 等. 城市污泥堆肥对蔬菜幼苗的盐害及其淋洗脱盐效果[J]. 中国给水排水, 2009, 25(15):112-114.
CAI Hong, CHEN Tong-bin, GAO Ding, et al. Salt damage of municipal sludge compost to vegetable seedlings and its leaching desalinization[J]. *China Water & Waste Water*, 2009, 25(15):112-114.
- [27] 汤华, 柳晓磊. 盐胁迫下玉米苗期农艺性状和脯氨酸含量变化的研究[J]. 中国农学通报, 2007, 24(3):244-249.
TANG Hua, LIU Xiao-lei. The changes of proline content and agronomical traits under salt stress in maize seedling stage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 24(3):244-249.