

渗滤液 MBR-NF 浓缩液回收含腐植酸水溶肥料 对不同种子发芽及幼苗生长的影响

辜龙香, 许玉东*

(福州大学环境与资源学院, 福州 350108)

摘要: 采用水培条件下种子发芽试验方法, 研究了所提取的含腐植酸水溶肥料对黄瓜、甘蓝、莴苣和黑麦草 4 种作物的种子萌发及幼苗早期生长的影响。结果表明: 未稀释或低倍数稀释的高浓度含腐植酸水溶肥料对所有 4 种供试作物种子的萌发均有抑制作用, 其中对莴苣种子的胁迫最为明显; 而稀释倍数达到 20 倍以上的含腐植酸水溶肥料对发芽率则不再呈抑制作用。在作物幼苗生长阶段, 该含腐植酸水溶肥料对幼苗的长度和重量均表现出高浓度抑制和低浓度促进作用, 其中高浓度含腐植酸水溶肥料对供试作物根长的抑制程度高于芽长, 对幼苗生长的抑制作用大于发芽率; 而对于不同供试作物的生长促进作用, 低浓度含腐植酸水溶肥料的最佳稀释倍数则有所不同(在 10~25 倍之间), 在最佳稀释倍数下, 含腐植酸水溶肥料对幼苗生长的促进作用顺序为黄瓜最大、甘蓝和莴苣次之、黑麦草最小。

关键词: 渗滤液; 腐植酸; 水溶肥料; 种子; 发芽; 幼苗生长

中图分类号: X705 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)03-0424-07 doi:10.11654/jaes.2015.03.003

Seed Germination and Seedling Growth as Influenced by Humic Substances-containing Water-soluble Fertilizer Produced from Landfill Leachate-derived Concentrate Generated During Membrane Bio-reactor Coupled with Nanofiltration Process

GU Long-xiang, XU Yu-dong*

(College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Research has showed that the concentrate generated during the process of treating landfill leachate by membrane bio-reactor coupled with nanofiltration could be used to produce a humic substances-containing water-soluble fertilizer (HSWF). In this paper, a hydroponic experiment was conducted to investigate the effects of HSWF on seed germination and seedling growth of cucumber, cabbage, lettuce and perennial ryegrass. Results show that HSWF at original or low dilution had significant inhibition effects on seed germination of all crops tested, with lettuce being the most sensitive. However, such inhibition disappeared when the fertilizer was diluted at more than 20 times. The length and weight of all crops were inhibited by high concentrations, but enhanced by low concentrations of HSWF. The fertilizer showed greater inhibition to the root length than shoot length, as well as to seedling growth than seed germination. The optimum concentrations of the fertilizer for promoting crop growth ranged from 10 to 25 time dilution depending on crops. The promoting effect of the fertilizer was cucumber>cabbage and lettuce>perennial ryegrass.

Keywords: landfill leachate; humic; water-soluble fertilizer; seed; germination; seedling growth

垃圾渗滤液是一种高浓度难降解有机废水, 其成分复杂, 有机物、氨氮浓度高, 含有重金属、微量有机

物等有毒有害物质, 此外还含有较高浓度的腐植酸及丰富的植物生长所需的各种营养元素等物质^[1-5]。大量工程实践表明, 采用 MBR-NF 典型工艺处理渗滤液, 其出水完全能够达到排放标准^[6], 但与此同时产生了占原液体积 1/4~1/6 的 MBR-NF 截留液^[7], 该截留液具有高 COD、高盐度、可生化性差、色度高等特点^[8], 目前工程上还没有经济适用的处理工艺。由于腐植酸

收稿日期: 2014-10-31

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2009H0024); 福建省自然科学基金项目(2012J01205)

作者简介: 辜龙香(1990—), 女, 福建泉州人, 硕士研究生, 从事废水治理与资源化研究工作。E-mail: glx168@qq.com

* 通信作者: 许玉东 E-mail: xuyd2008@fzu.edu.cn

含量一般占截留液中有有机物 60%~75%以上^[7,9],可以考虑通过资源化方法来实现无害化处理。本课题组的前期研究也表明,采用膜工艺提取 MBR-NF 浓缩液中腐植酸为水溶肥料^[10],其腐植酸、重金属等主要指标均能满足国家标准要求^[11-12]。但渗滤液中含有种类繁多的有毒有害物质,虽然经生化处理后可以得到有效去除,但仍有部分污染物无法完全去除而维持在微量水平,这些微量有毒有害物质可能随着腐植酸的提取而富集,从而对产品品质产生影响。

已有研究结果表明,垃圾渗滤液对种子萌发表现出高浓度抑制、低浓度促进的作用^[13],同样可以明显促进萌发后幼苗的生长^[14]。但渗滤液 MBR-NF 浓缩液回收含腐植酸水溶肥料(以下简称 HS 肥料)对作物种子发芽影响的研究还未见报道,HS 肥料对作物种子萌发后幼苗生长是否具有促进作用也不清楚。本文利用水培条件下种子发芽试验,探讨 HS 肥料对作物发芽及幼苗生长的影响,以期 HS 肥料的实际应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

所有供试种子购于福建金山种子有限公司。黄瓜种子由中国郑州市蔬菜研究所联合选育;甘蓝种子由中国农科院蔬菜花卉所育成;莴苣由四川省正奇农业开发有限责任公司生产;黑麦草由百绿(天津)国际草业有限公司生产。所有种子的纯度在 95%~98%之间,净度在 98%~99%之间,含水量为 7%~8%。

渗滤液 MBR-NF 浓缩液回收 HS 肥料是采用“纳滤+超滤”工艺^[10]从渗滤液 MBR-NF 浓缩液提取出来的产品。HS 肥料特性如表 1 所示。

表 1 含腐植酸水溶肥料水质
Table 1 Characteristics of HSWF

| 指标 | 测定值 | 指标 | 测定值 | 指标 | 测定值 |
|------|--------|-------------------------------|--------|----|-------|
| COD | 46 530 | TDS/g·L ⁻¹ | 68.4 | As | 0.85 |
| 胡敏酸 | 1577 | FDS/g·L ⁻¹ | 24.2 | Pb | 0.18 |
| 富里酸 | 35 100 | VDS/g·L ⁻¹ | 44.2 | Cd | nd |
| 盐度/‰ | 13 | 电导率 | 22.2 | Cr | 6.28 |
| 氨氮 | 593 | pH | 6.48 | Cu | 6.86 |
| 总磷 | 40.4 | Cl ⁻ | 15 997 | Ni | 27.42 |
| Na | 1707 | NO ₂ ⁻ | 129 | Zn | 31.7 |
| K | 1143 | NO ₃ ⁻ | 266 | Co | 6.67 |
| Ca | 4308 | SO ₄ ²⁻ | 2967 | Al | 14.02 |
| Mg | 3734 | Mn | 11.87 | Fe | 39.71 |

注:电导率单位为 mS·cm⁻¹,除 pH 无单位和特别标明外,各指标单位均为 mg·L⁻¹;n d 为未检出。

1.2 试验方法

将 HS 肥料按 1、1.5、2、3、4、6、8、10、15、20、25、50、100、200、300、500 的稀释倍数进行稀释,以自来水为对照,共 17 个处理组,每处理组两次重复。选取直径为 10 cm 的培养皿,以双层滤纸为发芽床,将稀释好的试验液 5 mL 置于培养皿中,试验时挑选颗粒饱满、大小一致的种子,视其大小每皿放入一定数量,整齐排列在发芽床上,盖上培养皿盖将培养皿置于培养箱中,(25±1)℃下培养,保持黑暗。每天称重加水法加水,在保持溶液质量浓度恒定条件下进行发芽试验。每日观察种子的发芽情况,记录发芽数。

在对照组种子发芽率>60%,且根长度>20 mm 时终止实验。取出发芽种子,测量根长、芽长、根鲜重和芽鲜重(根和芽以胚轴和根之间的过渡点为界分开),计算平均值和抑制率。

1.3 数据分析方法

实验数据采用 SPSS 17.0 和 Excel 进行处理,分析各处理的差异性及相关性。采用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析、LSD 多重比较和相关回归统计分析,差异显著性水平为 P<0.05。

2 结果与讨论

2.1 HS 肥料对种子发芽的影响

HS 肥料对 4 种种子发芽的影响如图 1 所示。高浓度 HS 肥料的加入对莴苣种子发芽产生显著抑制,在试验范围稀释倍数为 1~3 倍时,未见莴苣种子发芽,当稀释倍数为 4 倍时,莴苣种子开始发芽,此时发芽抑制率达 97.33%,只有极少数种子发芽;随着稀释倍数的增大,莴苣种子发芽率抑制率逐渐减小,当稀释倍数大于 15 倍直至 500 倍时,莴苣种子发芽与对照组无显著差异,均大于 90%。

当 HS 肥料稀释倍数在 1~20 倍范围时,黄瓜和

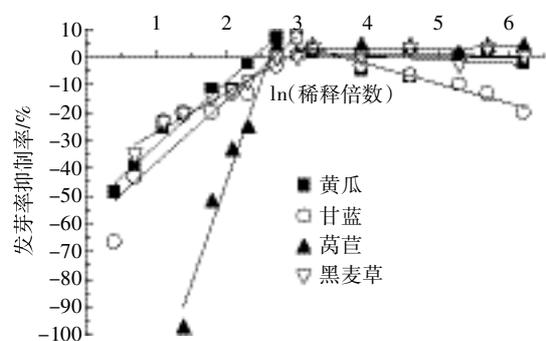


图 1 不同稀释倍数 HS 肥料处理对作物发芽率的影响

Figure 1 Effect of HSWF on seed germination rate of crops

甘蓝发芽率抑制率变化趋势基本一致。HS 肥料稀释 1.5 倍, 黄瓜和甘蓝种子都开始萌发, 此时甘蓝发芽率抑制率为 66.67%, 大于黄瓜的 48.84%。HS 肥料稀释倍数分别大于 15 和 20 倍时, 黄瓜和甘蓝发芽率不受抑制, 发芽率在 90% 以上。随后, 黄瓜发芽率始终与对照组相当, 甘蓝发芽率却随 HS 肥料稀释倍数的继续增加反而下降, 甚至受抑制, 当稀释倍数为 500 倍时, 甘蓝发芽率抑制率达 20%。分析其原因, 在试验过程中, 发现甘蓝种子有发霉现象, 且随 HS 肥料稀释倍数的增加发霉趋严重, 直至影响发芽率^[15], 有研究表明大于一定浓度的黄腐酸有明显的抑菌作用^[16], 所以随稀释倍数增加腐植酸含量降低, 导致种子发霉严重而影响发芽率。这可能就是甘蓝发芽率降低的主要原因。

经 2 倍稀释的 HS 肥料可使黑麦草种子发芽, 此时发芽率抑制率为 35.29%, 比其他三种种子都小, 但黑麦草发芽率随 HS 肥料稀释倍数的增加恢复较缓慢, 与黄瓜和莴苣一样 HS 肥料稀释倍数为 15 倍, 黑麦草种子发芽率与对照组相当, 在 90% 以上。

试验结果表明, 高浓度 HS 肥料对所有种子的萌发都有抑制作用。不同种子发芽率对 HS 肥料的敏感度不同, 稀释倍数在 1~20 倍范围内, 以种子发芽率的 EC_{50} 为指标, 对 HS 肥料毒性的敏感顺序为莴苣>甘蓝>黄瓜>黑麦草, 莴苣对 HS 肥料的抑制作用最为敏感。Lodhi 等^[17]研究发现高浓度腐植酸会对种子萌发生产生抑制作用, 且 HS 肥料的电导率高达 $22.2 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 而电导率超过 $2 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时就会对种子的萌发产生影响, 明显降低发芽率^[18], 说明种子萌发受抑制原因可能是腐植酸本身的胁迫作用, 也可能是 HS 肥料中存在的大量盐离子以及微量有毒有害物质的毒害作用。因这些负面作用会随着 HS 肥料稀释倍数的增加而消失, 所以稀释至一定倍数后, 种子的发芽率与对照组无明显差异, 可以保持在 90% 以上。

2.2 HS 肥料对幼苗生长的影响

2.2.1 HS 肥料对作物芽伸长的影响

由表 2 和图 2 可以看出, 自 HS 肥料稀释至 2 倍后, 黄瓜、甘蓝和黑麦草种子随着稀释倍数的增大, 其芽伸长均呈明显上升趋势。HS 肥料稀释倍数为 3 倍条件下, 黄瓜的芽伸长与对照组相比已无显著差异; 当稀释倍数大于 3 倍时, 黄瓜芽伸长显著大于对照组, 与对照组相比 HS 肥料对黄瓜的芽伸长表现出明显的促进作用; 稀释倍数为 8~15 倍时, 芽伸长高出对照组 104%~122%。而当 HS 肥料稀释倍数大于 20 倍

表 2 不同稀释倍数 HS 肥料处理对作物芽伸长的影响(cm)

Table 2 Effect of HSWF on shoot length of crops

| 稀释倍数 | 黄瓜 | 甘蓝 | 莴苣 | 黑麦草 |
|------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| 自来水 | 2.75±0.57b | 3.22±0.41c | 2.02±0.28a | 5.32±1.01c |
| 1 | | | | |
| 1.5 | nd | nd | | |
| 2 | 2.05±0.34a | 1.17±0.36a | | 0.84±0.35a |
| 3 | 2.79±0.75b | 2.08±0.45b | | 2.68±1.09b |
| 4 | 3.65±0.60cd | 3.18±0.44c | nd | 3.18±0.87b |
| 6 | 5.27±0.54ef | 3.78±0.32efg | 4.69±0.36i | 5.23±1.22c |
| 8 | 5.61±0.64efg | 4.10±0.43gh | 4.18±0.34g | 5.31±0.86c |
| 10 | 6.10±0.79fg | 4.34±0.47hi | 3.88±0.39f | 5.87±0.91cde |
| 15 | 5.76±0.67fg | 4.51±0.53i | 3.72±0.31f | 6.52±1.04e |
| 20 | 5.31±0.80ef | 4.64±0.41i | 3.49±0.30e | 6.09±0.80de |
| 25 | 5.29±0.61ef | 4.08±0.44gh | 3.33±0.28e | 5.86±0.85cde |
| 50 | 5.10±0.53e | 3.93±0.46fg | 2.85±0.30d | 6.15±1.02e |
| 100 | 4.08±0.67d | 3.84±0.33efg | 2.43±0.27c | 6.17±0.88e |
| 200 | 3.95±0.59cd | 3.67±0.47def | 2.24±0.30b | 6.01±0.81de |
| 300 | 3.48±0.62c | 3.45±0.46cd | 2.12±0.24ab | 6.08±1.27de |
| 500 | 3.55±0.80c | 3.57±0.35de | 2.00±0.24a | 5.44±0.78cd |

注: 具有相同小写字母表示无显著差异, 不同字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$); 空白表示种子未发芽, nd 表示长度小于 0.3 cm 未测。下同。

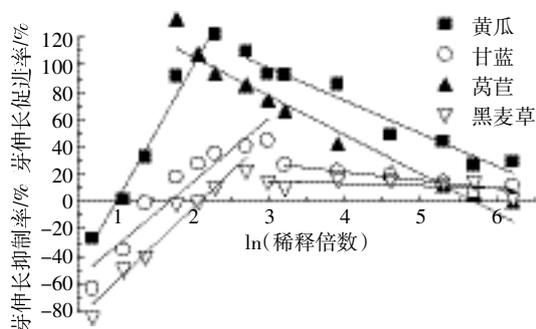


图 2 不同稀释倍数 HS 肥料处理对作物芽伸长的影响

Figure 2 Effect of HSWF on relative shoot length of crops

时, 黄瓜芽伸长开始减小, 直至 200 倍时趋于稳定, 但仍然显著大于对照组。这可能是因为随稀释倍数的增加腐植酸含量减少造成的。

甘蓝种子的芽伸长随 HS 肥料稀释倍数的变化趋势与黄瓜相似, 但抑制和促进作用相差较大。当稀释倍数为 4 倍时, HS 肥料对甘蓝芽伸长的抑制作用消失, 开始表现出明显的促进作用, 当稀释倍数为 10~20 倍时, 甘蓝芽伸长高出对照组 34%~44%, HS 肥料对其促进作用明显小于黄瓜。

HS 肥料对黑麦草种子芽伸长抑制作用大于黄瓜和甘蓝, 当稀释倍数为 6~8 倍时, HS 肥料对其芽伸长

抑制作用消失;当稀释倍数大于 10 倍直至 300 倍, HS 肥料对黑麦草芽伸长的促进作用始终保持平稳, 促进率在 10%~23% 范围内。

莴苣种子芽伸长的变化趋势与黄瓜、甘蓝和黑麦草有很大的区别,在 1~4 倍的实验条件下,莴苣种子基本未发芽,接近 100% 的抑制。但稀释倍数为 6 倍时,莴苣种子开始发芽,且芽伸长为所有处理组的最大值,高出对照组 132%。随着稀释倍数的进一步增加,HS 肥料对莴苣芽伸长的促进作用开始减小,直至 300 倍时,与对照组相当。由图 1 可知,低稀释倍数的 HS 肥料对莴苣发芽率表现出极强的抑制作用,当稀释倍数为 6 倍时莴苣种子才开始发芽,此时 HS 肥料对黄瓜、甘蓝、黑麦草三种作物芽伸长的抑制作用已消失,说明稀释 6 倍的 HS 肥料中有毒物质含量已经不对作物芽伸长产生抑制作用,所以莴苣一发芽 HS 肥料就对其表现出促进作用。

总的来说,当 HS 肥料在低稀释倍数时,除莴苣未发芽外三种作物种子的芽伸长均会受到抑制,芽伸长对 HS 肥料敏感顺序为黑麦草>甘蓝>黄瓜,但抑制作用会随稀释倍数的增加逐渐减小直至消失;在较高稀释倍数下,反而表现出对 4 种作物种子芽伸长的明显促进作用,其大小依次为黄瓜>莴苣>甘蓝>黑麦草。Lulakis 等^[19]研究胡敏酸和富里酸对西红柿幼苗生长的影响,在最佳浓度下,胡敏酸对西红柿芽伸长促进率为 46%,富里酸为 32%,结果与本试验具有可比性,说明从渗滤液中提取的 HS 可以达到一般腐植酸肥料对植物相近的促进作用。因此施用适宜浓度的 HS 肥料,可以明显促进作物芽的生长。

2.2.2 HS 肥料对作物单株芽鲜重的影响

由图 3 可知,黄瓜、甘蓝、莴苣和黑麦草的单株芽鲜重明显受到 HS 肥料不同稀释倍数的影响,在小于 20 倍稀释条件下,其单株芽鲜重随 HS 肥料稀释倍数的增大而出现不同程度的增加。甘蓝和黑麦草单株芽

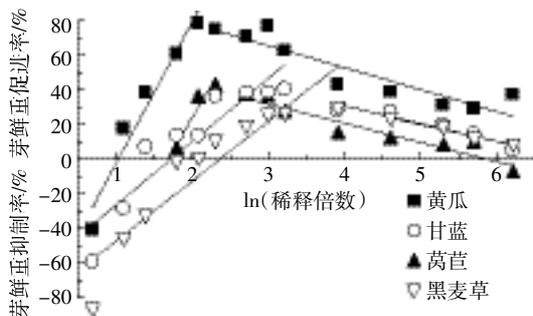


图 3 不同稀释倍数 HS 肥料处理对作物芽鲜重的影响

Figure 3 Effect of HSWF on relative shoot weight of crops

鲜重受 HS 肥料影响情况与其芽伸长基本一致;黄瓜单株芽鲜重变化趋势与其芽伸长相似,但 HS 肥料对芽鲜重最大促进率比芽伸长降低了约 40%;在 HS 肥料稀释倍数为 6 倍、莴苣芽伸长最大时,其芽鲜重反而最小,但与对照组相当,无明显抑制。

2.2.3 HS 肥料对作物根伸长的影响

腐植酸可以加大根体积,增加根系长度,提高根系吸收表面积,有利于根系的生长发育^[20]。试验中 HS 肥料对供试几种作物的根伸长在稀释倍数较小时有显著的抑制作用,而在较大稀释倍数时,有显著的促进作用(表 3)。

表 3 不同稀释倍数 HS 肥料处理对作物根伸长的影响(cm)

| Table 3 Effect of HSWF on root length of crops | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|------------|
| 稀释倍数 | 黄瓜 | 甘蓝 | 莴苣 | 黑麦草 |
| 自来水 | 4.19±0.75b | 3.14±0.57d | 3.15±0.28a | 6.97±0.90e |
| 1 | | | | |
| 1.5 | 1.40±0.31a | n.d. | | |
| 2 | 2.69±0.38b | 0.88±0.25a | | 1.24±0.36a |
| 3 | 4.57±0.73c | 1.41±0.28b | | 3.39±0.72b |
| 4 | 5.48±0.91d | 1.97±0.43c | n.d. | 4.74±0.64c |
| 6 | 6.09±1.11de | 3.08±0.62d | 4.78±0.30d | 5.62±0.89d |
| 8 | 6.77±1.03e | 4.11±0.83e | 5.09±0.30e | 6.63±0.97e |
| 10 | 7.70±0.74f | 4.53±0.68ef | 5.33±0.31fg | 7.80±0.92f |
| 15 | 7.65±0.92f | 5.51±0.72g | 5.55±0.28hi | 7.87±0.96f |
| 20 | 7.49±0.94f | 5.78±0.73g | 5.73±0.35i | 7.62±0.93f |
| 25 | 6.42±1.00e | 4.83±0.62f | 5.49±0.31gh | 7.66±0.79f |
| 50 | 6.45±1.08e | 4.79±0.62f | 5.24±0.29ef | 7.79±0.83f |
| 100 | 6.34±1.06e | 4.77±0.63f | 3.94±0.33c | 7.68±0.80f |
| 200 | 6.03±0.87de | 4.41±0.67ef | 3.59±0.31b | 7.63±0.84f |
| 300 | 6.27±1.02e | 4.29±0.44e | 3.56±0.34b | 7.60±0.85f |
| 500 | 6.36±0.66e | 4.52±0.58ef | 3.62±0.27b | 7.02±0.81e |

当 HS 肥料稀释倍数为 2 倍时,除莴苣种子未萌发外,黑麦草根长受抑制的程度最大,相比对照根长抑制率达 82.2%;随稀释倍数增加到 8 倍时,黑麦草根伸长开始不受抑制;当稀释倍数在 10~300 倍时,HS 肥料对黑麦草根伸长促进作用达到显著水平,促进率在 9%~13%。

莴苣种子根与芽的生长情况一样,开始发芽 HS 肥料对其根伸长即表现出明显的促进作用,与芽伸长不同的是,根伸长促进作用有先上升后下降的趋势,最大促进范围在 75.9%~81.7%(图 4);当稀释倍数大于 25 倍时,HS 肥料对莴苣根伸长促进作用明显降低,但始终保持在 10% 以上。

HS 肥料对黄瓜和甘蓝根伸长的最大促进作用也

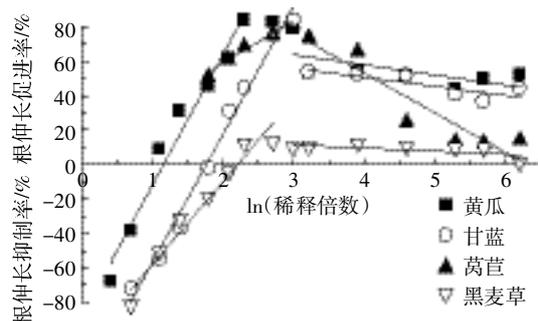


图4 不同稀释倍数 HS 肥料处理对作物根伸长的影响
Figure 4 Effect of HSWF on relative root length of crops

达到 80%;HS 肥料稀释至 3 倍即对黄瓜根伸长无抑制作用,而甘蓝需稀释至 6 倍,说明甘蓝根伸长受 HS 肥料抑制的程度高于黄瓜;与莴苣根伸长相似,当稀释倍数大于 25 倍时,黄瓜和甘蓝根伸长开始减小,最终保持在 40%以上。

在 HS 肥料较低稀释倍数时,除莴苣未发芽外,黄瓜、甘蓝和黑麦草根伸长都受到 HS 肥料的抑制。与芽伸长一致,黄瓜根伸长不受稀释 3 倍的 HS 肥料抑制;甘蓝和黑麦草芽伸长不受 HS 肥料抑制的稀释倍数分别是 4 倍和 6 倍,而根伸长为 6 倍和 8 倍,说明根伸长受 HS 肥料抑制作用大于芽伸长,与其他污染物研究结果相似^[21-22]。不同种子根伸长对 HS 肥料毒性敏感顺序和芽伸长一致:黑麦草>甘蓝>黄瓜。除莴苣外,HS 肥料对三种种子根伸长达达到最大促进作用的稀释倍数也和芽伸长一致。

2.2.4 HS 肥料对作物单株根鲜重的影响

由图 5 可见,不同供试作物单株根鲜重对 HS 肥料的敏感度区分比较明显。黑麦草幼苗单株根鲜重对 HS 肥料胁迫最敏感,当 HS 肥料稀释倍数达 15 倍时,黑麦草单株根鲜重才不受抑制,且始终未表现出明显的促进作用。

除黑麦草外,较大稀释倍数的 HS 肥料均对根鲜

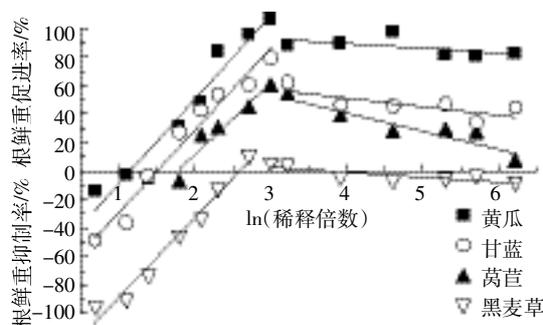


图5 不同稀释倍数 HS 肥料处理对作物根鲜重的影响
Figure 5 Effect of HSWF on relative root weight of crops

重有明显的促进作用。对黄瓜促进率最大可达 106.6%,且随着稀释倍数的增加无明显下降,促进率始终保持在 80%以上;对甘蓝和莴苣根鲜重最大促进率分别为 78.6%和 59.6%。

2.2.5 各作物发芽率及幼苗生物量的 EC₅₀ 值

腐植酸作为有机肥料,不但能够自身提供植物所需养分,还可以对其他肥料、农药、盐分等起到缓释作用^[23],提高肥料利用率,减少对环境的污染。本实验采用的 HS 肥料是从垃圾渗滤液 MBR-NF 浓缩液中分离提取的,由前文分析可知,其中仍然存在对种子发芽和幼苗生长产生毒害的物质。在试验稀释倍数小于 20 倍范围内,进行 HS 肥料与种子发芽率、芽伸长、根伸长及鲜重的抑制率回归分析,计算各作物发芽率及幼苗生物量较对照减少 50%时所需的 HS 肥料临界值(EC₅₀),结果如表 4 所示。

表 4 各作物发芽率及幼苗生物量的 EC₅₀ 值

Table 4 EC₅₀ values of seed germination rate and seedling biomass of crops under HSWF

| 项目 | 黄瓜 | 甘蓝 | 莴苣 | 黑麦草 |
|-----|------|------|------|------|
| 发芽率 | 1.23 | 1.61 | 6.88 | 1.00 |
| 芽伸长 | 1.64 | 1.88 | - | 3.21 |
| 芽鲜重 | 1.52 | 1.44 | - | 2.52 |
| 根伸长 | 1.64 | 2.99 | - | 3.23 |
| 根鲜重 | 1.36 | 1.90 | - | 5.45 |

注:-说明当莴苣种子开始发芽,HS 肥料对生物指标即表现出促进作用。

由表 4 可知,不同种子在 HS 肥料胁迫下表现出的敏感性不同,以发芽率为指标,莴苣对 HS 肥料最为敏感,以幼苗生物量为指标,除莴苣外的三种作物对 HS 肥料的敏感性依次是黑麦草>甘蓝>黄瓜。同一种作物不同生物指标对 HS 肥料的敏感性也存在差异,总体上依次为根>芽>发芽率。Tong 等^[24]研究得到渗滤液对上海青和狗牙根根伸长的 96 h-EC₅₀ 分别为 6.2%和 13.3%(即分别稀释 16.13 倍和 7.52 倍),大于本实验三种种子根伸长的 EC₅₀,说明渗滤液经 MBR 处理后,NF 膜浓缩液生物毒性已大为降低,从而也降低了 HS 肥料的毒性。

综上所述,分离回收的 HS 肥料用自来水(在实际应用中也可用河水等清水)稀释至适宜浓度下对作物种子萌发和幼苗生长具有明显的促进作用,特别是对作物幼苗的根和芽,在长度和重量方面都有明显的增加。但是,与其他来源腐植酸浓度的变化有规律地影响其对种子萌发和作物生长的促进作用一样^[25-26],

该 HS 肥料使用剂量太低效果不明显,太高又有抑制作用,且对不同作物的影响不尽相同,对同一种作物在不同的生长期影响也不同。根据上述实验结果,建议该 HS 肥料稀释 20~500 倍使用,此时对应的 HS 浓度为 73~1834 mg·L⁻¹。边文骅等^[25]用厌氧发酵生产的腐植酸中提取出的黄腐酸进行试验,结果表明在 50~200 mg·L⁻¹ 范围内促进作物生长,以 100 mg·L⁻¹ 左右最佳。张辉等^[26]研究不同来源腐植酸促进植物生长的活性表明,腐植酸对于玉米,在 200 mg·L⁻¹ 以前浓度增加促进作用加强,大于 200 mg·L⁻¹ 后促进作用开始下降,浓度达到 600 mg·L⁻¹ 时,则表现为抑制种子萌发,所以对于玉米,最合适的浓度为 200~300 mg·L⁻¹;而对于黄瓜,其最佳浓度为 100 mg·L⁻¹,抑制浓度为 400 mg·L⁻¹。另有报道称,水稻早期施用腐植酸的最佳浓度为 150~200 mg·L⁻¹,而后期为 200~250 mg·L⁻¹^[27]。因此,结合经济效益考虑,该 HS 肥料稀释倍数宜取前述高值区间。

3 结论

(1) HS 肥料在较小稀释倍数条件下,对 4 种作物的各项指标均产生抑制作用;在较大稀释倍数条件下,均有不同程度的促进作用。

(2) 未经稀释的 HS 肥料完全抑制了所有种子的萌发,对比不同种子的发芽情况,以发芽率为指标,莴苣种子对 HS 肥料胁迫最敏感,HS 肥料稀释 4 倍时才开始萌发;以幼苗生物量为指标,除莴苣外三种作物对 HS 肥料的敏感性依次是黑麦草>甘蓝>黄瓜。HS 肥料稀释倍数大于等于 15 倍时,对所有种子均无抑制作用。

(3) 经稀释至一定范围的 HS 肥料对供试作物的萌发和生长都能起到促进作用,不同作物达到最大促进时 HS 肥料的稀释倍数不一致,总体上在 10~25 倍之间。在最佳稀释倍数下,HS 肥料对黄瓜幼苗生长的促进作用最大,其次是甘蓝和莴苣,对黑麦草的促进作用最小。

参考文献:

- [1] Hernandez A J, Adarve M J, Gil A, et al. Soil salination from landfill leachates: Effects on the macronutrient content and plant growth of four grassland species[J]. *Chemosphere*, 1999, 38(7): 1693-1711.
- [2] Kang K H, Shin H S, Park H. Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications [J]. *Water Research*, 2002, 36(16): 4023-4032.
- [3] Nanny M A, Ratasuk N. Characterization and comparison of hydrophobic neutral and hydrophobic acid dissolved organic carbon isolated from three municipal landfill leachates[J]. *Water Research*, 2002, 36(6): 1572-1584.
- [4] Calace N, Liberatori A, Petronio B M, et al. Characteristics of different molecular weight fractions of organic matter in landfill leachate and their role in soil sorption of heavy metals[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 113(3): 331-339.
- [5] Park S, Choi K S, Joe K S, et al. Variations of landfill leachate's properties in conjunction with the treatment process[J]. *Environmental Technology*, 2001, 22(6): 639-645.
- [6] Ahmed F N, Lan C Q. Treatment of landfill leachate using membrane bioreactors: A review[J]. *Desalination*, 2012, 287: 41-54.
- [7] Zhang L, Li A M, Lu Y F, et al. Characterization and removal of dissolved organic matter (DOM) from landfill leachate rejected by nanofiltration[J]. *Waste Management*, 2009, 29(3): 1035-1040.
- [8] Top S, Sekman E, Hoşver S, et al. Characterization and electrocoagulative treatment of nanofiltration concentrate of a full-scale landfill leachate treatment plant[J]. *Desalination*, 2011, 268(1-3): 158-162.
- [9] 许玉东, 方艺民. 垃圾焚烧厂发电厂渗滤液 MNR-NF 截留液中腐植酸的超滤分离回收研究[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(4): 1467-1474. XU Yu-dong, FANG Yi-min. Separation and recovery of humic acids from MBR-NF retentate of incineration leachate by ultrafiltration[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(4): 1467-1474.
- [10] 许玉东, 柯金井, 黄友福. 腐植酸的提取方法: 中国, ZL201110272283. 7[P]. 2011-09-15. XU Yu-dong, KE Jin-jing, HUANG You-fu. A method for humic acid extraction; China, ZL201110272283. 7[P]. 2011-09-15.
- [11] 方艺民. 垃圾焚烧厂渗滤液 MBR-NF 浓缩液中腐植酸的纳滤-超滤分离回收研究[D]. 福州: 福州大学, 2013. FANG Yi-min. Study on separation and recovery of humic substances from incineration leachate MBR-NF concentrates by nanofiltration and ultrafiltration combined processes[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2013.
- [12] 王升. 渗滤液 MBR-NF 膜浓缩液中腐植酸的分离回收机制研究[D]. 福州: 福州大学, 2014. WANG Sheng. Mechanisms of separation and recovery of humic substances from leachate MBR-NF concentrates[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014.
- [13] 许建民, 刘艳. 不同稀释强度的垃圾渗滤液对草木樨种子萌发的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(22): 9393-9394, 9448. XU Jian-min, LIU Yan. Effect of landfill leachate with different dilution intensity on germinating of melilotus suaveolens ledeb seeds[J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2008, 36(22): 9393-9394, 9448.
- [14] Romero C, Ramos P, Costa C, et al. Raw and digested municipal waste compost leachate as potential fertilizer: Comparison with a commercial fertilizer[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 59: 73-78.
- [15] 岳瑾, 王伟青, 董杰, 等. 不同处理方法对黄瓜种子带多主棒孢霉菌及发芽率的影响[J]. *中国植保导刊*, 2014, 34(1): 39-41. YUE Jin, WANG Wei-qing, DONG Jie, et al. Effect of corynespora

- cassiicola and germination rate with different processing methods on the cucumber seed[J]. *China Plant Protection*, 2014, 34(1):39-41.
- [16] 高金岗, 王锐萍, 郝清玉, 等. 生化黄腐酸与常见抑菌药品的抑菌效果比较[J]. *腐植酸*, 2009(5):18-23.
- GAO Jin-gang, WANG Rui-ping, HAO Qing-yu, et al. Comparison of antibacterial effect between biochemical fulvic acid and common anti-bacterial drugs[J]. *Humic Acid*, 2009(5):18-23.
- [17] Lodhi A, Tahir S, Iqbal Z, et al. Characterization of commercial humic acid samples and their impact on growth of fungi and plants[J]. *Soil and Environment*, 2013, 32(1):63-70.
- [18] Sanchez P L, Chen M K, Pessaraki M, et al. Effects of temperature and salinity on germination of non-pelleted and pelleted guayule (*Parthenium argentatum* A. Gray) seeds[J]. *Industrial Crops and Products*, 2014, 55:90-96.
- [19] Lulakis M D, Petsas S I. Effect of humic substances from vine-canes mature compost on tomato seedling growth[J]. *Bioresource Technology*, 1995, 54(2):179-182.
- [20] 李志洪, 李翠兰, 王淑华, 等. 有机、无机复合肥及调节剂对玉米根系生长和根际效应的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2004, 26(2):165-169.
- LI Zhi-hong, LI Cui-lan, WANG Shu-hua, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer and regulator on maize roots and rhizosphere[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2004, 26(2):165-169.
- [21] 鲍艳宇, 周启星, 谢秀杰. 四环素类抗生素对小麦种子芽与根伸长的影响[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(6):566-570.
- BAO Yan-yu, ZHOU Qi-xing, XIE Xiu-jie. Influence of tetracycline kind antibiotics on the control of wheat germination and root elongation[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(6):566-570.
- [22] 魏子艳, 王金花, 夏晓明, 等. 三种抗生素对蔬菜种子芽与根伸长的生态毒性效应[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(2):237-242.
- WEI Zi-yan, WANG Jin-hua, XIA Xiao-ming, et al. Ecotoxicity of three antibiotics to shoots and root elongation of cucumber, rape and Chinese cabbage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(2):237-242.
- [23] Aydin A, Kant C, Turan M. Humic acid application alleviates salinity stress of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants decreasing membrane leakage[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2012, 7(7):1073-1086.
- [24] Tonga S T Y, Wongh M H. Bioassay tests of landfill leachate using *Brassica chinensis* and *Cynodon dactylon*[J]. *Ecological Aspects of Solid Waste Disposal*, 1984, 7(2-4):283-294.
- [25] 边文骅, 彭立凤. 腐植酸类液肥的生物活性检验方法初探[J]. *河北师范大学学报(自然科学版)*, 1999, 23(4):551-554, 557.
- BIAN Wen-hua, PENG Li-feng. Study of an examine way of the humic acid class liquid fertilizer's biology action[J]. *Journal of Hebei Normal University(Natural Science)*, 1999, 23(4):551-553, 557.
- [26] 张辉, 姜文勇, 刘波. 不同来源腐植酸促进植物生长活性及作用机理研究[J]. *腐植酸*, 2000(1):9-14.
- ZHANG Hui, JIANG Wen-yong, LIU Bo. A research on that the humic acid of different sources accelerates the growth activity of plants and it's mechanism of action[J]. *Humic Acid*, 2000(1):9-14.
- [27] 赵日明, 苏益, 蔺万煌. 腐植酸对水稻生长及相关生理指标的影响[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(36):14163-14165.
- ZHAO Ri-ming, SU Yi, LIN Wan-huang. Effects of humic acid on rice growth and related physiological indexes[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(36):14163-14165.