

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20150404001

李广科, 贾午耀, 库婷婷, 等. 不同粒径矿化垃圾对大麦生长发育和斑马鱼胚胎毒性效应研究[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(6): 136-143

Li G K, Jia W Y, Ku T T, et al. The particle-size-dependent effects of aged refuse on the growth and development of barley seedlings and zebrafish embryos [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2015, 10(6): 136-143 (in Chinese)

不同粒径矿化垃圾对大麦生长发育和斑马鱼胚胎毒性效应研究

李广科, 贾午耀, 库婷婷, 闫微, 宁夏, 张英英, 姬晓彤, 桑楠*

山西大学环境与资源学院, 太原 030006

收稿日期: 2015-04-04 录用日期: 2015-07-10

摘要: 将太原东山新沟垃圾填埋场矿化垃圾筛分为 900~300 μm 、300~150 μm 、150~105 μm 、105~90 μm 和 90~0 μm 共 5 个不同粒径范围, 制备浸出液。在分析不同粒径矿化垃圾浸出液的理化指标基础上, 研究了矿化垃圾浸出液对大麦和斑马鱼胚胎生长发育的影响。结果显示, 矿化垃圾浸出液 pH 值随粒径的减小而减小, 电导率、 COD_{Cr} 、全盐量和总氮则随粒径的减小而增大。矿化垃圾浸出液对大麦的萌发、根长和芽长均表现出抑制作用, 且抑制作用随粒径的减小而显著增加, 90~0 μm 抑制作用最强, 具体表现为染毒 1 d、2 d 和 3 d 后, 大麦种子处理组萌发率为对照组的 39.74%、56.38% 和 59.81%; 染毒 3 d、5 d 和 7 d 后, 根长分别为对照组的 57.08%、48.33% 和 41.66%; 芽长分别为对照组的 66.60%、64.79% 和 61.65%。斑马鱼胚胎暴露于不同粒径的矿化垃圾浸出液中, 胚胎生长发育的毒害作用与粒径大小呈现明显负相关关系, 即在最小粒径 90~0 μm 处理后, 卵凝结、血循环异常、孵化率、心包水肿及脊柱畸形影响作用达到最大, 这 5 个指标值分别为 40.28%、50.00%、51.39%、31.94% 和 29.17%。以上研究表明, 矿化垃圾浸出液对大麦和斑马鱼胚胎生长发育的毒性效应与矿化垃圾粒径分布显著相关, 小粒径矿化垃圾(90~0 μm)的生态毒性效应最大。

关键词: 矿化垃圾; 大麦; 斑马鱼胚胎; 粒径分布

文章编号: 1673-5897(2015)6-136-08 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

The Particle-size Dependent Effects of Aged Refuse on the Growth and Development of Barley Seedlings and Zebrafish Embryos

Li Guangke, Jia Wuyao, Ku Tingting, Yan Wei, Ning Xia, Zhang Yingying, Ji Xiaotong, Sang Nan*

College of Environment and Resource, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Received 4 April 2015 accepted 10 July 2015

Abstract: In this study, the aged refuse, collected from Xingou municipal solid waste landfill of Taiyuan, was screened and classified into five samples with different particle-size (900~300, 300~150, 150~105, 105~90, and 90~0 μm), and then used to prepare leachate. Following this, several physical and chemical indexes were analyzed, and the effects on the growth and developmental of barley seedlings and zebrafish embryos were investigated. The results indicate that pH value decreased with the decrease of particle-size of aged refuse, conversely, electrical conductivity, COD_{Cr} , total salt and total nitrogen showed negative correlation with the particle-size. Furthermore, the

基金项目: 山西省科技攻关计划(20120313009-2); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20121401110003)

作者简介: 李广科(1971-), 男, 博士, 教授, 研究方向为固体废弃物处理、处置及资源化, E-mail: liguangke@sxu.edu.cn;

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: sangnan@sxu.edu.cn

germination, root length and shoot length of barley seedlings were inhibited by the aged refuse samples, and the effects were significantly negatively correlative with particle-size, especially for the smallest particle-size (90~0 μm). For the leachate of 90~0 μm aged refuse sample, the germination rate of barley seeding was 39.74%, 56.38% and 59.81% of control group after 1 d-, 2 d- and 3 d-exposure; the root length decreased to 57.08%, 48.33% and 41.66% of control and the shoot length decreased to 66.60%, 64.79% and 61.65% of control after 3 d-, 5 d- and 7 d-treatment. Similarly, the aged refuse leachate of different size of particles adversely affected embryonic growth and development, and the actions showed a significantly negative correlation with the particle size. The leachate of 90~0 μm aged refuse caused the most significant alterations on coagulation, abnormal blood circulation, hatchability, pericardial edema and spinal deformation of zebrafish embryos, and reached 40.28%, 50.00%, 51.39%, 31.94% and 29.17%, respectively. These findings imply that aged refuse could lead to the growth inhibition and developmental risk on barley seedlings and zebrafish embryos in a particle-size dependent manner, and the smallest particle-size sample (90~0 μm) showed the most serious injuries.

Keywords: aged refuse; barley seedlings; zebrafish embryos; particle-size distribution

随着城市化进程的加快,垃圾的产生量日益增多,垃圾填埋造成的城市近郊填埋场容量不断饱和、新建垃圾处理厂选址难度加大及环境污染严重等一系列问题已引起社会各界的广泛关注^[1]。扩大现有填埋场库容,延长填埋场的使用寿命,实现一定程度上的可持续填埋是解决上述问题的最佳途径^[2],而矿化垃圾资源化利用则是此方法实现的关键所在。矿化垃圾是一类可进行开采利用的垃圾,是指新鲜生活垃圾在填埋过程中经过长期的物理、化学及生物作用而形成的一种稳定化的类土壤物质^[3]。矿化垃圾的资源化利用能增加现有填埋场库容,对实现垃圾填埋场的动态持续填埋具有重要意义。

在矿化垃圾资源化方面,矿化垃圾可以作为填埋场覆盖材料,也可用于处理垃圾渗滤液和畜禽废水,同时,改良后的矿化垃圾可以替代农田土作为草坪的培养土等^[4-6]。矿化垃圾的资源化利用主要是基于其良好的多孔结构、巨大的比表面积、微生物相对丰富和氮磷钾营养物质含量高等优点^[7]。然而,矿化垃圾由于形成过程及机理的特殊性,不可避免的残留部分有毒有害重金属和有机物。在矿化垃圾再利用过程中,其表面所含的有害物质可能会进入环境中,对环境 and 人体健康造成一定危害。研究报道,填埋龄在 10~12 年的矿化垃圾浸出液会对植物的萌发和生长产生抑制作用,且不同植物对浸出液毒性的敏感程度不同^[8];另外,矿化垃圾会造成植物遗传和氧化损伤,尤其是沉积有较多污染物的小粒径处理组引发的损伤效应最为显著^[9]。由此我们猜测,矿化垃圾有效利用过程中产生的毒害作用可能与其粒径分布相关。

由于土地资源紧缺与城市垃圾产量迅速增加的矛盾日益突出,矿化垃圾用作土地利用是实现其资源化的一条有效的途径。大麦由于具有试验周期短、操作简单、耐旱耐盐等特点,而被作为模式植物应用于环境毒理学实验,因此采用大麦来评价矿化垃圾对陆生生物的生长效应具有广泛的现实意义。矿化垃圾在资源化过程中产生的浸出液有可能会渗漏到地下环境中,对水生生物造成危害。斑马鱼胚胎由于其胚胎发育快,孵化时间短等特点,已经被经济合作与发展组织(OECD)作为测试水体环境毒性的标准方法之一^[10]。本研究通过不同粒径矿化垃圾浸出液对大麦和斑马鱼胚胎进行毒性试验,观察大麦萌发率、根长、芽长和斑马鱼胚胎的凝结率、孵化率、畸形率和血循环的变化,探讨不同粒径矿化垃圾的毒性效应,为矿化垃圾的资源化利用提供理论依据。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 试验材料

矿化垃圾采自山西省太原市东山新沟垃圾填埋场,该填埋场于 1987 年投入使用,2007 年封场。试验土样按照随机采样法采集。从矿化垃圾中剔除大石块、碎玻璃、破塑料等杂物,将矿化垃圾过孔径为 900 μm 的分级筛,筛下物继续筛分为 900~300 μm 、300~150 μm 、150~105 μm 、105~90 μm 和 90~0 μm 共 5 个不同粒径范围,风干贮存。按 1:5(m/V) 将上述矿化垃圾与蒸馏水混合,在 30 $^{\circ}\text{C}$ 条件下振荡 3 h,抽滤,所得滤液即为矿化垃圾浸出液,于 4 $^{\circ}\text{C}$ 保存备用。

大麦(*Hordeum vulgare*):“瀛丰原种”从上海杂粮批发城购买。斑马鱼(*Danio rerio*):从上海热带鱼

水族馆购买。

1.2 实验方法

1.2.1 水样分析测试方法

COD_{Cr}(重铬酸钾法)、总氮(碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度法)、电导率(电导率仪法)、pH(电极法)参照《水和废水监测分析方法》测定^[11]。全盐量(重量法)参照《水质-全盐量的测定-重量法 HJ/T51—1999》测定^[12]。

1.2.2 大麦萌发毒性试验

选饱满大麦种子,浸泡 4 h 后,随机选择 50 粒大小一致的种子置于铺有两层滤纸的培养皿内。萌发率以种子破白计,每隔 1 d 检测种子萌发数。对照组用自来水培养,处理组用不同粒径矿化垃圾浸出液培养。进行 3 次独立实验,每组设置 3 个平行。

1.2.3 大麦生长毒性试验

选饱满大麦种子,浸泡 4 h 后,湿纱布包裹催芽。待种子萌发后,随机选择 30 个根长为 1.5 cm 左右、长势一致的大麦置于铺有两层滤纸的培养皿上,25 °C 恒温培养(光照/黑暗周期为 14 h:10 h)。对照组用自来水培养,处理组用不同粒径矿化垃圾浸出液培养,每隔 12 h 换一次培养液,设 3 个重复。大麦生长 3 d、5 d、7 d 时测量根长芽长,计算各处理组的单株平均值,作为各组幼苗的芽长根长。

1.2.4 斑马鱼胚胎毒性试验

实验前一天,挑选连续饲养 4 周以上,性成熟的成鱼,按雌雄比为 1:2 配对放在装有孵化盒的水族箱内,并用隔板分开,次日清晨光照 0.5~1 h 后产卵,用虹吸管吸出受精卵,用蒸馏水冲洗鱼卵以去除粪便等杂物,洗净的鱼卵在培养皿中孵化至 24 h 后用于暴露实验。用不同粒径矿化垃圾浸出液对发育正常的斑马鱼胚胎进行 24 hpf(受精后 24 h)染毒实

验,斑马鱼胚胎置于 24 孔板中,每孔放一个卵并加入 1 mL 不同粒径矿化垃圾浸出液,对照组加入蒸馏水,实验重复 3 次,每次设置 3 个平行。置于温度恒定(26±1) °C 培养箱中培养(光照/黑暗周期为 14 h:10 h)。观察并记录斑马鱼胚胎的凝结、血循环、孵化情况至 96 hpf。将矿化垃圾浸出液用蒸馏水稀释 2 倍按照上述步骤对斑马鱼胚胎染毒,观察并记录斑马鱼胚胎的心包水肿和脊柱畸形情况。斑马鱼胚胎卵凝结表现为胚胎不透明或后期幼鱼无心脏跳动,发育停止。斑马鱼胚胎血循环障碍表示未形成正常血液循环的胚胎,具体表现为发育迟缓、未出现血液循环、出现血液但流速较慢、甚至出现局部循环。凝结率(%)=(凝结胚胎数量/总胚胎数量)×100;血循环异常率(%)=(未形成正常血液循环胚胎数量/总胚胎数量)×100;孵化率(%)=(已孵化胚胎数量/总胚胎数量)×100;心包水肿率(%)=(心包水肿胚胎数量/孵化胚胎数量)×100;脊柱畸形率(%)=(脊柱畸形胚胎数量/孵化胚胎数量)×100。

1.3 数据分析方法

用 Origin 8.0 和 SPSS 17.0 对数据进行统计分析,图中结果均以均值±SE 值表示,用 One-way ANOVA 检验处理组与对照组的显著性差异。为确定矿化垃圾粒径分布与理化指标的相关关系,采用 Pearson's 双变量相关分析法对数据进行统计分析(* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$)。

2 结果 (Results)

2.1 矿化垃圾浸出液理化指标

不同粒径矿化垃圾浸出液理化性质如表 1 所示,由表可知,矿化垃圾浸出液的 pH 值随粒径的减小而减小;电导率、COD_{Cr}、全盐量和总氮等指标的

表 1 矿化垃圾浸出液理化指标

Table 1 Characteristics of the leaching samples from different particle-size aged refuse

理化指标 Physical and chemical index	粒径分布/μm Particle-size distribution/μm					
	900~0	900~300	300~150	150~105	105~90	90~0
pH	7.08	7.14	7.10	7.05	7.04	6.93
电导率/(ms·cm ⁻¹) Conductivity/(ms·cm ⁻¹)	3.47	3.03	3.29	3.93	4.20	4.28
化学需氧量/(mg·L ⁻¹) COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	44.98	30.12	42.17	49.40	55.02	57.83
全盐量/(mg·L ⁻¹) Total salt/(mg·L ⁻¹)	3 224.00	2 980.67	3 098.00	3 377.33	3 525.33	3 635.00
总氮/(mg·L ⁻¹) Total nitrogen/(mg·L ⁻¹)	148.04	106.46	123.01	149.76	177.70	192.00

浓度会随粒径的减小逐渐增大。表 2 为矿化垃圾粒径分布与理化指标的相关性分析,由表可得,矿化垃圾浸出液 pH 值与粒径分布呈显著的正相关关系,而电导率、化学需氧量、全盐量和总氮与粒径分布均呈显著的负相关。综上所述,小粒径的矿化垃圾更容易累积污染物。

2.2 矿化垃圾对大麦萌发的影响

不同粒径矿化垃圾浸出液对大麦种子萌发率的影响如图 1 所示,从图中可以看出,矿化垃圾处理组对大麦种子的萌发均有抑制作用,粒径越小,抑制作用越强。处理 1 d 时,90~0 μm 处理组的萌发率最低,为对照组的 39.74%;在处理 2 d 和 3 d 时,矿化垃圾处理组的萌发率均有所提高,缩短了与对照组之间的差异;但 90~0 μm 处理组萌发率依然最低,2 d 时为对照组的 56.38%,3 d 时为对照组的 59.81%,*P* 值均小于 0.001,有显著性差异。结果表明,矿化垃圾浸出液能够延缓大麦种子的萌发。

2.3 矿化垃圾对大麦根长和芽长的影响

不同粒径矿化垃圾对大麦根长和芽长的影响如

图 2。统计结果表明,矿化垃圾浸出液对大麦根长和芽长的影响与处理时间及矿化垃圾粒径大小相关。同一处理时间时,矿化垃圾粒径越小对大麦生

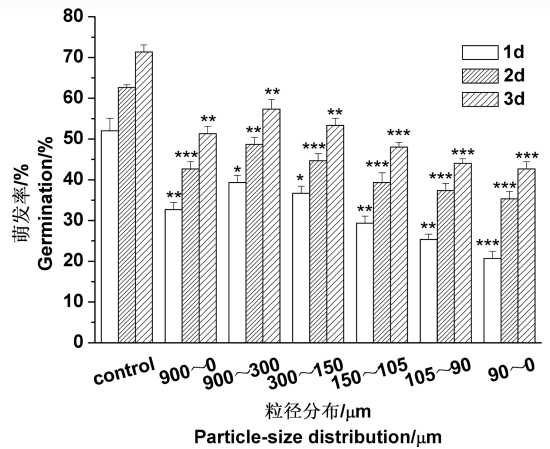


图 1 不同粒径矿化垃圾对大麦种子萌发率的影响

注: * *P* < 0.05, ** *P* < 0.01, *** *P* < 0.001, Mean ± SE, *n* = 3。

Fig. 1 Effect of the particle-size distribution of aged refuse on germination of barley seedlings

Note: * *P* < 0.05, ** *P* < 0.01, *** *P* < 0.001, Mean ± SE, *n* = 3.

表 2 矿化垃圾理化指标与其粒径分布的相关性分析

Table 2 Correlations between physical and chemical index and particle-size distribution

	pH	电导率/(ms·cm ⁻¹) Conductivity (/ms·cm ⁻¹)	化学需氧量/(mg·L ⁻¹) COD _{Cr} (/mg·L ⁻¹)	全盐量/(mg·L ⁻¹) Total salt (/mg·L ⁻¹)	总氮/(mg·L ⁻¹) Total nitrogen (/mg·L ⁻¹)
粒径 Particle-size	0.958*	-0.966**	-0.970**	-0.987**	-0.994**

注: * *P* < 0.05, ** *P* < 0.01。

Note: * *P* < 0.05, ** *P* < 0.01.

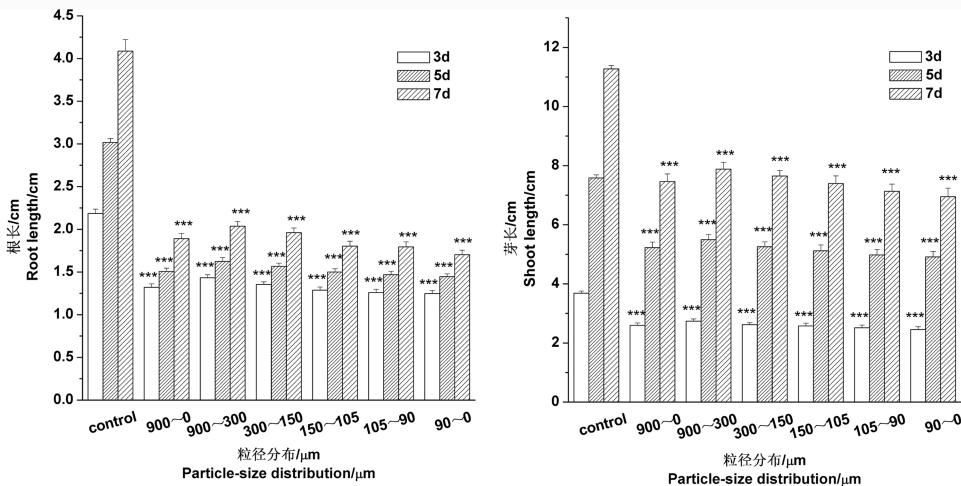


图 2 不同粒径矿化垃圾对大麦根长和芽长的影响

注: *** *P* < 0.001, Mean ± SE, *n* = 3。

Fig. 2 Effect of the particle-size distribution of aged refuse on root length and shoot length of barley seedlings

Note: *** *P* < 0.001, Mean ± SE, *n* = 3.

长的抑制作用越明显。用浸出液对大麦染毒,3 d 时 90~0 μm 处理组抑制作用最强,根长为对照组的 57.08%,芽长为对照组的 66.60% ($P < 0.001$);同一粒径矿化垃圾浸出液处理时,大麦根长和芽长受到的抑制作用随处理时间的延长而增强;5 d 时 90~0 μm 处理组根长为对照组的 48.33%,芽长为对照组的 64.79%;7 d 时 90~0 μm 处理组根长和芽长分别为对照组的 41.66% 和 61.65% ($P < 0.001$)。

2.4 矿化垃圾对斑马鱼胚胎凝结率和血流循环的影响

通过显微镜观察斑马鱼胚胎发育情况可知,斑马鱼受精卵呈半透明状,如图 3 所示,斑马鱼胚胎暴露于矿化垃圾浸出液中,可引起卵凝结,孵化率降低,还有发育异常,包括血流循环异常和脊柱畸形。

不同粒径矿化垃圾浸出液对斑马鱼胚胎凝结率和血流循环的影响如图 4 所示,矿化垃圾浸出液染毒组斑马鱼胚胎 48 hpf 凝结率均高于对照组,且矿化垃圾处理导致的胚胎凝结率与粒径大小相关,即粒径越小,胚胎凝结率越高。其中 90~0 μm 染毒组凝结率最高,凝结率为 40.28% ($P < 0.01$);900~300 μm 毒性最低,凝结率为 20.83% ($P < 0.01$)。

由图 4 结果还可以看出,24 hpf 胚胎暴露于不同粒径矿化垃圾浸出液中,48 hpf 出现血流循环异常,具体表现为发育延缓,未出现血流循环或者血流循环缓慢甚至局部出现血流循环,其血循环异常百分率明显高于对照组,且随着粒径的减小呈升高趋势。900~300 μm 最低为 29.17%,90~0 μm 最高为

50% ($P < 0.001$),均有显著性差异,这与之前矿化垃圾对大麦种子的萌发率、根长和芽长的影响趋势一致。

2.5 矿化垃圾对斑马鱼胚胎孵化率的影响

图 5 为矿化垃圾浸出液对胚胎处理后 96 hpf 孵化的情况。结果表明,不同粒径矿化垃圾浸出液处理组孵化率与对照组相比均显著降低。随着粒径的减小,对胚胎孵化率的抑制作用明显增强,900~300 μm 处理组孵化率最高为 73.61%, P 值小于 0.01,有显著性差异;90~0 μm 处理组孵化率最低为 51.39%, P 值小于 0.001,有显著性差异。

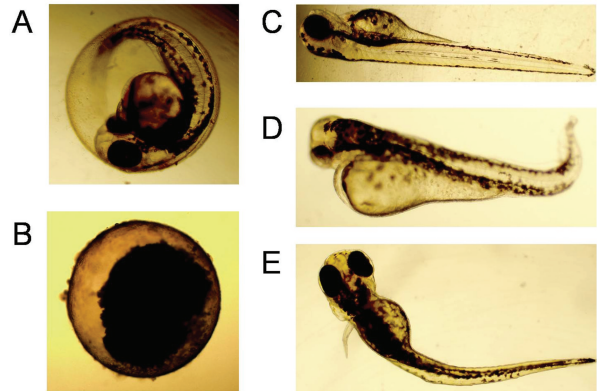


图 3 斑马鱼胚胎各发育时期形态特征
注:A,正常胚胎;B,凝结胚胎;C,正常幼鱼;
D,心包水肿;E,脊柱畸形。

Fig. 3 Morphological characteristics of zebrafish embryos in different development stages

Note: A, normal zebrafish embryos; B, coagulative zebrafish embryos; C, normal zebrafish; D, pericardial edema; E, spinal deformation.

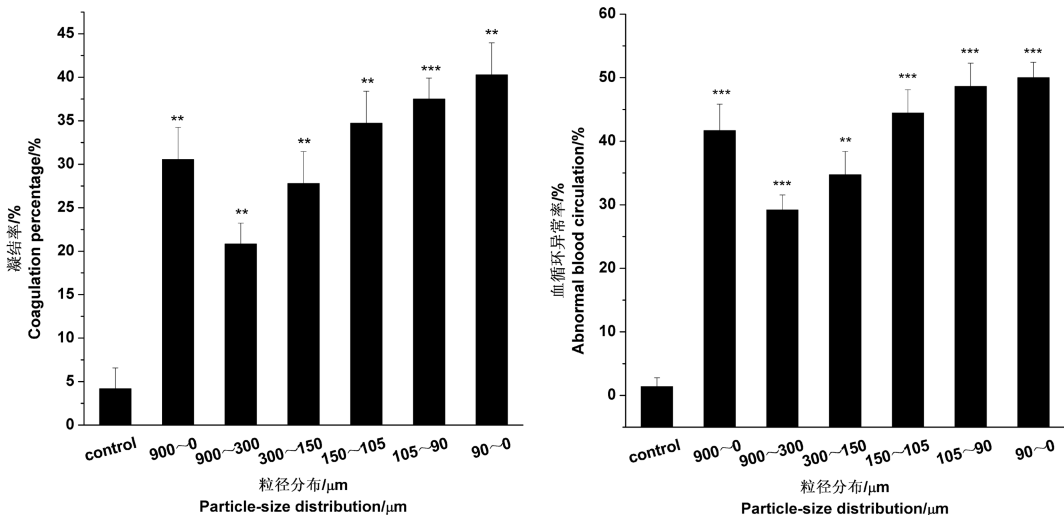


图 4 不同粒径矿化垃圾对斑马鱼胚胎凝结率和血流循环的影响

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, Mean \pm SE, $n=3$ 。

Fig. 4 Effect of the particle-size distribution of aged refuse on coagulation percentage and blood circulation of zebrafish embryos

Note: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, Mean \pm SE, $n=3$.

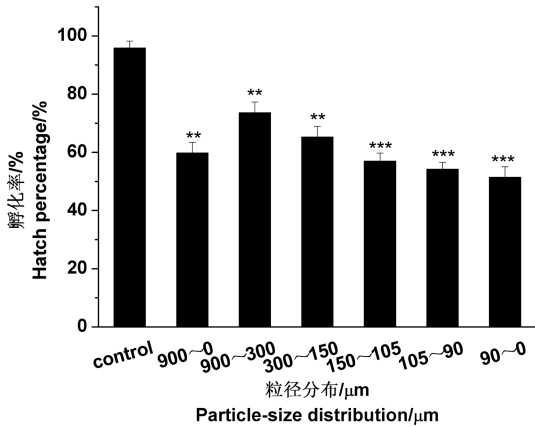


图 5 不同粒径矿化垃圾对斑马鱼胚胎孵化率的影响

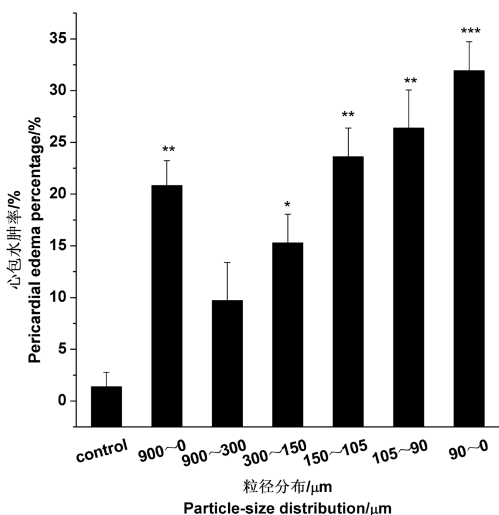
注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, Mean \pm SE, $n=3$ 。

Fig. 5 Effect of the particle-size distribution of aged refuse on hatch percentage of zebrafish embryos

Note: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, Mean \pm SE, $n=3$.

2.6 矿化垃圾引起斑马鱼胚胎心包水肿和脊柱畸形

在考察斑马鱼胚胎心包水肿和脊柱畸形实验中,均把矿化垃圾浸出液稀释 2 倍进行染毒,96 hpf 记录并观察其心包水肿和脊柱畸形。由图 6 可知,矿化垃圾对斑马鱼胚胎心脏和脊柱发育毒性与粒径大小呈负相关,即粒径越小,引起胚胎心包水肿和脊柱畸形的百分率越大,900~300 μm 处理组最低,出现心包水肿百分比为 9.72%,出现脊柱畸形率为 8.33%,与对照组无显著性差异;90~0 μm 处理组出现心包水肿和脊柱畸形的百分比分别为 31.94% 和 29.17%,与对照组差异显著($P < 0.001$)。



2.7 大麦萌发生长和斑马鱼胚胎发育与粒径分布的相关性分析

由表 2 可得,大麦生长与矿化垃圾粒径分布呈显著的正相关关系,具体表现为,粒径越小,大麦的萌发率、根长和芽长越小。由表 3 可知,斑马鱼胚胎的凝结率、血循环、心包水肿和脊柱畸形与矿化垃圾粒径分布呈显著的负相关关系,即粒径越小,凝结率、血循环、心包水肿率和脊柱畸形率越大;而斑马鱼胚胎的孵化率与粒径分布呈显著的正相关关系,即粒径越小,其孵化率越小。

3 讨论 (Discussion)

矿化垃圾资源化利用始于 20 世纪 50 年代以色列特拉维夫市填埋场,之后关于垃圾填埋场开采利用的报道逐渐增多^[13]。与国外相比,国内对填埋场垃圾稳定化的研究较晚。1992 年,以上海老港垃圾填埋场为基地,赵由才等^[3]展开了对矿化垃圾稳定化及资源利用研究。研究表明,矿化垃圾比表面积

表 3 大麦萌发与生长与粒径分布的相关性分析

Table 3 Correlations between germination and growth of barley seedlings and particle-size distribution

	萌发率 Germination	根长 Root length	芽长 Shoot length
粒径 Particle-size	0.992**	0.972**	0.998**

注: ** $P < 0.01$, 下同。

Note: ** $P < 0.01$, the same below.

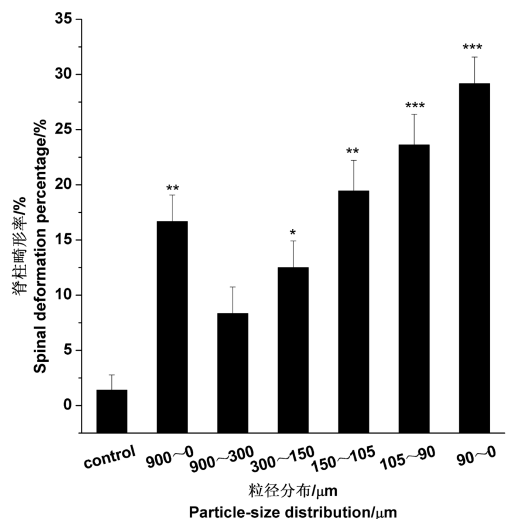


图 6 不同粒径矿化垃圾引起斑马鱼胚胎心包水肿和脊柱畸形

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, Mean \pm SE, $n=3$ 。

Fig. 6 Effect of the particle-size distribution of aged refuse on pericardial edema and deformation of zebrafish embryos

Note: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, Mean \pm SE, $n=3$.

表 4 斑马鱼胚胎发育与粒径分布的相关性分析

Table 4 Correlations between development stages of zebrafish embryos and particle-size distribution

	凝结率 Coagulation	血循环 Blood circulation	孵化率 Hatch rate	心包水肿 Pericardial edema	脊柱畸形 Spinal deformation
粒径 Particle-size	-0.967**	-0.968**	0.967**	-0.990**	-0.997**

较大、结构松散、水力传导和渗透性能较好、微生物种类繁多。有学者利用矿化垃圾这种性质,以矿化垃圾作为生物反应床填料,在处理垃圾渗滤液,畜牧废水,生活污水及含酚类废水等方面已取得一定成果,并引起国内外广泛关注^[14-15]。矿化垃圾资源化日趋成熟,但其表面所含的污染物质会进入环境进而对生物体造成一定的危害。

本文首先对不同粒径矿化垃圾的理化性质进行了相关性分析研究,发现矿化垃圾粒径越小其 pH 值越小,而电导率、化学需氧量、全盐量和总氮却随着粒径的减小而增大。已有研究表明小粒径物质更容易富集重金属^[16],且小颗粒矿化垃圾由于比表面积较大,容易沉积更多的营养物质及污染物质^[9,17]。在探讨了不同粒径矿化垃圾理化性质的基础上,本文以大麦为模式植物深入探讨矿化垃圾对植物生长发育过程的影响。本研究结果表明矿化垃圾对大麦的生长具有抑制作用,且与染毒时间和粒径分布相关,即随着粒径的减小,矿化垃圾表面富集有更多的污染物,对大麦种子萌发、幼苗根长芽长抑制作用更明显。而本实验中最小粒径矿化垃圾浸出液中的 COD_{Cr} 值为 57.83 mg·L⁻¹,低于《生活垃圾填埋场污染控制标准 GB16889—2008》中规定的 100 mg·L⁻¹^[18],可见矿化垃圾中的有机物影响较小,主要是盐分胁迫的作用。用矿化垃圾浸出液对斑马鱼胚胎染毒结果表明,胚胎凝结率、孵化率、畸形率和血循环均与粒径大小有关,与之前对大麦的染毒结果是一致的,即粒径越小,矿化垃圾富含的可溶性盐分越多,胚胎的各项指标都升高,进一步证明了斑马鱼胚胎灵敏、快速的优点,适用于填埋场生态风险评价。

研究表明,盐分胁迫会抑制大麦种子的萌发,造成植物叶片面积缩小,引起大麦脂质过氧化损伤及相关抗氧化酶指标的变化^[19];而盐分胁迫会破坏水生生物胚胎的渗透压平衡,进而影响其代谢、生长;盐分也可能通过影响水生生物的抗氧化酶系统对其生物体本身产生一定的毒害作用^[20]。由此推断,矿化垃圾对大麦幼苗生长和斑马鱼胚胎发育抑制作用的主要原因,一方面可能是由于污染物影响细胞的

正常代谢,另一方面,可能大麦受到浸出液中可溶性盐分的刺激,影响细胞分裂和细胞内基因转录进而造成一些抗氧化酶的活性发生改变,导致细胞代谢紊乱。

综上所述,矿化垃圾粒径不同,理化特性存在差异,其生物安全性也随之变化。因此,在矿化垃圾资源化利用过程中,需要寻求改良矿化垃圾方案,提高其资源利用效率,减小生态风险。

通讯作者简介:桑楠(1973-),女,博士,教授,博士生导师,从事环境医学与毒理学研究,发表学术论文 50 余篇。

参考文献 (References):

- [1] 杨玉江, 赵由才. 老港生活垃圾填埋场垃圾组成和资源化价值研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(2): 116-118
Yang Y J, Zhao Y C. Research on composition and recycle value of aged refuse at Shangha refuse landfill [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007, 1(2): 116-118 (in Chinese)
- [2] 赵海涛, 刘平, 王小治, 等. 矿化垃圾基本理化性状剖面变化特征研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(7): 1624-1628
Zhao H T, Liu P, Wang X Z, et al. Profile characteristics in physical and chemical properties of aged-refuse [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(7): 1624-1628 (in Chinese)
- [3] Zhao Y C, Wang L C, Hua R H, et al. A comparison of refuse attenuation in laboratory and field scale lysimeters [J]. Waste Management, 2002, 22(1): 29-35
- [4] Hassan M, Xie B. Use of aged refuse-based bioreactor/biofilter for landfill leachate treatment [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, 98(15): 6543-6553
- [5] Zhu D L, Sun C, Zhang H H, et al. Roles of vegetation, flow type and filled depth on livestock wastewater treatment through multi-level mineralized refuse-based constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2012, 39: 7-15
- [6] Hurst C, Longhurst P, Pollard S, et al. Assessment of municipal waste compost as a daily cover material for odour

- control at landfill sites [J]. *Environmental Pollution*, 2005, 135(1): 171-177
- [7] 赵海涛, 王小治, 徐轶群, 等. 矿化垃圾中植物大量营养元素含量的剖面分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(9): 1980-1986
- Zhao H T, Wang X Z, Xu Y Q, et al. Distribution of plant macro-elements in profile of aged refuse [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1980-1986 (in Chinese)
- [8] 万涛, 孙英杰, 卞荣星. 矿化垃圾浸出液对植物发芽与幼苗生长的影响研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2014, 35(2): 59-65
- Wan T, Sun Y J, Bian R X. Study on the effect of aged refuse lixivium on seed germination and plant growth [J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2014, 35(2): 59-65 (in Chinese)
- [9] Li G K, Niu J, Sang N. Assessing the phytotoxicity of different particle-size aged refuse using *Zea mays* L. bio-assay [J]. *Chemosphere*, 2008, 74(1): 106 - 111
- [10] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Guideline for the testing chemicals: Fish embryo toxicity (FET) test [R]. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development, 2006
- [11] 魏复盛. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 102-257
- [12] 国家环境保护总局. HJ/T51—1999 水质-全盐量的测定-重量法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999
- [13] Nelson H. Landfill reclamation project on the rise [J]. *Biocycle*, 1995, 36(3): 83-84
- [14] Zhao Y C, Lou Z Y, Guo Y L, et al. Treatment of sewage using an aged-refuse-based bioreactor [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 82(1): 32-38
- [15] Chai X L, Zhao Y C. Adsorption of phenolic compound by aged-refuse [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137: 410-417
- [16] Östman M, Wahlberg O, Mårtensson A. Leachability and metal-binding capacity in ageing landfill material [J]. *Waste Manage*, 2008, 28(1): 142-150
- [17] Li G K, Liu X F, Han M, et al. Selecting tolerant grass seedlings and analyzing the possibility for using aged refuse as sward soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(4): 620-625
- [18] 国家环境保护总局. GB16889—2008 生活垃圾填埋场污染控制标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
- [19] Seckin B, Turkan I, Sekmen A H, et al. The role of antioxidant defense systems at differential salt tolerance of *Hordeum marinum* Huds. (sea barleygrass) and *Hordeum vulgare* L. (cultivated barley) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 69(1): 76-85
- [20] Wu H F, Liu X L, Zhao J M, et al. Toxicological responses in halophyte *Suaeda salsa* to mercury under environmentally relevant salinity [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 85: 64-71