

渗滤液场内处理的有机物去除特征和植物毒性评价

何晶晶, 王如意, 邵立明, 李国建

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:以 3 种不同处理水平的渗滤液为研究对象, 从有机物去除特征和植物毒性角度研究通过渗滤液循环回灌和终场覆盖层灌溉 2 个单元处理生活垃圾填埋场渗滤液的可行性. 结果表明, 循环回灌对老港渗滤液中的小分子量亲水性物质类(HyI)有机物去除效果较好, 去除率为 91.2%; 终场覆盖层灌溉对循环回灌出水中的高分子量腐殖质类(HS)有机物去除效果较佳, 去除率为 85.7%; 两者串联组合的场内循环处理工艺对老港渗滤液中的溶解性有机物(DOM)去除率高达 96.9%, 且对 HS 和 HyI 均具较高的去除效果, 去除率分别为 96.6% 和 97.0%; 循环回灌和覆盖层灌溉这 2 个处理单元还具有梯级降低渗滤液植物毒性的作用.

关键词:渗滤液; 循环回灌; 终场覆盖层灌溉; 有机物去除特征; 植物毒性; 亲水性物质

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)01-0215-05

Study on Removal Characteristics of Organics in Leachates by Treatment Through Recirculation into Landfill and Their Phyto-toxicity Comparison

HE Pin-jing, WANG Ru-yi, SHAO Li-ming, LI Guo-jian

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Leachate from the regulation pond of Laogang landfill in Shanghai, effluent from an anaerobic methanogenic landfill column for recirculating Laogang landfill leachate and effluent of the recirculated leachate further treated by irrigation through mimic final cover, were selected to determine the feasibility of landfill leachate treatment through recirculation and final cover irrigation. The evaluation was based on removal characteristics of organic in the three landfill leachate and their phyto-toxicity. The results show that high efficiency was achieved for HyI substance in Laogang leachate by recirculation, indicated by 91.2% removal rate. For recirculated leachate, 85.7% of humic substance was removed efficiently by irrigation on landfill final cover. When the two treatment units were combined together to treat Laogang leachate, the removal rate of DOM reached to 96.9%, both HS and HyI were removed effectively, 96.6% and 97.0% removal rate achieved respectively. Phyto-toxicity of leachate influent could be obviously alleviated by recirculation and final cover irrigation.

Key words: landfill leachate; recirculated treatment; final cover treatment; removal characteristics of organics; phyto-toxicity; HyI

以甲烷化代谢填埋层循环回灌渗滤液为核心的生物反应器填埋技术, 能大幅度地降低生活垃圾填埋场渗滤液的污染负荷, 其出水水质特征类似于长填龄填埋层渗滤液, 生物可降解性差、腐殖类物质居多, 且氨氮浓度高^[1,2]; 此类渗滤液难以再作生物处理, 而物化处理成本很高. 根据其水质特征, 利用一定控制措施下渗滤液灌溉对植物土壤系统的生态正效应^[3~5], 采用填埋场最终覆盖层的灌溉处理, 因覆盖层土壤-植被系统的降解截留, 可取得良好的 COD 和氨氮去除效果^[6], 还可利用蒸散作用使之减量, 从而与填埋层循环回灌共同构成渗滤液场内处理系统.

渗滤液中的有机物绝大部分为溶解性有机物(DOM), 可采用树脂吸附和离子交换技术将上述渗滤液中的溶解性有机物(DOM)进行适当分类^[7]. 本研究比较分析了 3 种渗滤液 DOM 的分类特征、芳构化程度和分子量分布等性质, 并对其作了植物毒性测试. 据此, 探讨循环回灌和终场覆盖层灌溉这 2 个

处理单元对渗滤液 DOM 的去除效果和规律; 并评价填埋层循环回灌和终场覆盖层灌溉单元组合而成的场内循环处理工艺, 对填埋场渗滤液的污染控制有效性. 研究结果可为判断渗滤液场内处理效果和选择渗滤液适宜处理方法提供依据.

1 材料与方法

1.1 实验水样来源及水质

实验选用 3 种处理水平的渗滤液: 上海老港生活垃圾填埋场调节池渗滤液(简称老港原液); 老港调节池渗滤液经处于稳定产甲烷期垃圾填埋柱循环回灌处理后的出水(简称循环出水)和该循环出水经模拟垃圾填埋场终场覆盖层灌溉处理后的出水(简

收稿日期: 2006-01-01; 修订日期: 2006-03-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2001AA644010, 2003AA644020, 2005AA644010); 国家自然科学基金重点项目(50538080)

作者简介: 何晶晶(1962~), 男, 教授, 主要研究方向为固体废弃物处理及资源化, E-mail: solidwaste@mail.tongji.edu.cn

称灌溉出水). 稳定产甲烷厌氧填埋柱结构及处理操作同文献[2]; 模拟终场覆盖层为柱体, 柱体材料为聚丙烯, 有效尺寸 1 m × 1 m × 0.9 m, 其底部为 50 mm 厚陶粒集水层, 上为 800 mm 营养土, 营养土上种植高羊茅(*Festuca arundinacea*)作为植被; 每天定时布水(水力负荷 10 mm·d⁻¹), 并通过与陶粒集水层连接的水封管收集灌溉出水和取样. 实验历时 6 个月, 期间每 2 个月 1 次取各渗滤水样(连续 4 d 等量取样后混合为 1 个样品, 共 3 批样品)进行水质指标和植物毒性分析; 3 批样品各指标值偏差均小于 10%, 以 3 批分析平均值表达实验结果. 3 种处理水平渗滤液的水质特征见表 1.

表 1 实验用 3 种处理水平渗滤液的水质特征/mg·L ⁻¹			
Table 1 Characteristics of different landfill leachates/mg·L ⁻¹			
水质指标	老港原液	循环出水	灌溉出水
TOC	1 724 ~ 4 144	238 ~ 369	35 ~ 99
COD	5 310 ~ 14 010	593 ~ 1 112	92 ~ 421
BOD ₅	3 125 ~ 7 500	48 ~ 107	27 ~ 129
NH ₄ ⁺ -N	472 ~ 920	509 ~ 905	6 ~ 24
TP	8.1 ~ 14.6	1.7 ~ 2.8	0.8 ~ 4.9
BOD ₅ /COD	0.45 ~ 0.60	0.05 ~ 0.10	0.19 ~ 0.32
pH	7.0 ~ 8.0	8.0 ~ 9.0	7.0 ~ 8.0

1.2 实验方法

1.2.1 水质指标及测定方法

按照 Thurman 等提供的腐殖酸和富里酸的分离与净化方法, 对各渗滤液进行溶解性有机物(DOM)分类^[7~9]. 分离出的 3 类 DOM 为: 腐殖酸(HA)、富里酸(FA)和亲水性物质(HyI); 其中, HA 和 FA 统称为腐殖质(HS).

采用滤膜过滤法测定各渗滤液中 DOM 分子量分布, 选用上海原子核研究所膜分离技术研究发展中心研制的 SCM 系列杯式超滤器和 HM 系列平片超滤膜, 截留相对分子量(M_r)为: 10⁵、5 × 10⁴、10⁴、4 × 10³ 和 10³.

采用 TOC/TN 分析仪(multi N/C 3000)测定 TOC; DOC(溶解性有机碳)测定, 水样用 0.45 μm 滤膜过滤后, 再测定其 TOC 值; UV₂₅₄ 吸光度采用 752 紫外分光光度计测定; 比紫外吸收值(SUVA₂₅₄)定义为单位浓度 DOC 的紫外吸收值, 即 UV₂₅₄/DOC, 用于表征水中芳香族有机物的含量或水中有机物的芳香构造化程度^[10, 11].

1.2.2 植物毒性试验

种子发芽试验, 选用小麦(*Triticum aestivum*)作为试验材料, 小麦种子由安徽省种子公司提供. 选取均匀一致的种子, 将其整齐地排列在铺有滤纸的培养皿中(90 mm × 15 mm), 每皿放置 40 粒种子. 将不同处理水平的渗滤液或其稀释液 6 mL 加入皿中, 恰好浸没滤纸. 加盖聚乙烯薄膜后, 置黑暗培养箱中进行培养, 温度为 25℃ ± 1℃. 检测种子的发芽率, 与加入去离子水的种子发芽情况作对照. 每个浓度(包括对照)3 次重复.

植物幼根生长试验, 选籽粒饱满的小麦种子, 于 25℃ 浸种 3 h, 滤纸法 25℃ 恒温培养发芽. 种子萌发后, 选发育良好整齐的籽粒用于幼根生长毒性试验. 处理组用渗滤液及其稀释液培养, 对照组用去离子水培养. 每 12 h 更换培养液, 每隔 24 h 测量处理组 40 株幼苗最长幼根的长度, 计算各处理组单株平均值, 作为该组的长度值. 每组 3 次重复.

2 结果与分析

2.1 渗滤液场内处理前后的有机物特征分析

2.1.1 处理过程中 DOM 在渗滤液中所占比例

渗滤液经滤膜过滤前后有机物浓度变化如表 2 所示; 老港原液和循环出水 DOC 分别占滤前 TOC 的 89.5% 和 86.4%, 而灌溉出水中却占 96.7%. 可见, 各渗滤液中 DOM 占很大的比例, 非溶解性有机物所占比例很低.

表 2 渗滤液中的 DOM 含量			
Table 2 DOM content of different landfill leachates			
类别	老港原液	循环出水	灌溉出水
微滤前 TOC/mg·L ⁻¹	2 456	354.5	71.6
微滤后 DOC/mg·L ⁻¹	2 198	306.3	69.3
DOC/TOC	0.895	0.864	0.967

2.1.2 不同处理水平渗滤液 DOM 各类别所占比例

老港原液中亲水性物质类(HyI)所占比例最大, 为 66.3%(见表 3); 循环出水中 HyI 部分所占比例大幅度下降, 腐殖酸(HA)和富里酸(FA)所占比例上升. 老港原液和灌溉出水中 DOM 各组分排序为 HyI > FA > HA, 而循环出水中 DOM 各组分排序为 FA > HyI > HA, 腐殖质(HS)占一半以上, 达 58.2%. 说明处于稳定产甲烷期的厌氧垃圾填埋层对老港原液中的 HyI 具有好的去除效果, 表明此单元对可生化性较好的填埋初期渗滤液是有效的. 终场覆盖层灌溉处理对循环出水(类似长填龄渗滤液

水质^[2]的 DOM 去除率为 77.4%, 且对 HS 类有机物也有较好的去除效果, 去除率达 85.7%, 这表明此处理单元对难降解有机物的去除是有效的.

循环回灌对老港原液 DOM 的去除率为 86.1% (见表 3), 且对 HyI 类有机物的去除率高达 91.2%; 循环回灌和终场覆盖层灌溉处理串联组合的场内循

环处理工艺对老港原液 DOM 去除率高达 96.9%, 且对 HS 和 HyI 有机物均具有较高的去除效果; 其中, HS 去除率达 96.6%, 而 HyI 去除率为 97.0%. 可见, 循环回灌和终场覆盖层灌溉这 2 个处理单元优势互补, 克服了单个处理单元对某类有机物去除效果较差的缺点.

表 3 灌溉处理对渗滤液各类别 DOM 的去除效果
Table 3 Removal of different DOM fractions from leachates during irrigation treatment

类别	老港原液		循环出水			灌溉出水		
	DOC/mg•L ⁻¹	百分比/%	DOC/mg•L ⁻¹	百分比/%	去除率/%	DOC/mg•L ⁻¹	百分比/%	去除率/%
HA	41.6	1.9	31.3	10.2	24.8	0	0	100.0
FA	698.9	31.8	146.8	47.9	79.0	25.4	36.7	82.7
HS	740.5	33.7	178.2	58.2	75.9	25.4	36.7	85.7
HyI	1 457.5	66.3	128.1	41.8	91.2	43.9	63.3	60.8
DOM	2 198.0	100.0	306.3	100.0	86.1	69.3	100.0	77.4

2.1.3 不同处理水平渗滤液 DOM 的分子量分布

由表 4 可以看出, 老港原液以小分子量有机物为主, 其中 DOM 相对分子质量 10³ 以下占到 81.5%; 而渗滤液循环回灌出水的分子量分布范围较广, 10⁴ 以上占 45.0%, 4 × 10³ 以下占 47.2%; 各分子量区段中, 10⁴ ~ 5 × 10⁴ 间含量最高, 占 34.9%. 这也表明老港原液经循环回灌处理后, 小分子量有机物 (< 10³) 比例逐渐减小, 大分子量有机物所占比例逐渐增加. 循环

回灌对小分子量 (< 10³) 有机物的 DOM 去除量最多, 这是缘于原液中小分子量有机物具有更好的生物可降解性. 灌溉出水中, 低分子量有机物占主体, 4 × 10³ 以下达 63% 以上, 10⁴ 以上只占 28% 左右. 灌溉处理对各分子量区间的 DOM 都有一定的去除, 但 10⁴ ~ 5 × 10⁴ 部分去除量最大, 其次为小于 10³ 部分. 这与覆盖层灌溉处理可大部分去除循环出水中高分子量腐殖质(HS)的结果(见表 3)是一致的.

表 4 渗滤液中各分子量区间的 DOC 含量
Table 4 DOC content of different MW range in leachates

相对分子质量	老港原液		循环出水		灌溉出水	
	DOC/mg•L ⁻¹	百分比/%	DOC/mg•L ⁻¹	百分比/%	DOC/mg•L ⁻¹	百分比/%
> 10 ⁵	59.1	2.7	5.3	1.7	2.2	3.2
5 × 10 ⁴ ~ 10 ⁵	46.4	2.1	25.5	8.3	2.6	3.8
10 ⁴ ~ 5 × 10 ⁴	88.4	4.0	107.0	34.9	14.3	20.7
4 × 10 ³ ~ 10 ⁴	83.7	3.8	23.9	7.8	6.5	9.3
10 ³ ~ 4 × 10 ³	129.2	5.9	81.4	26.6	27.9	40.2
< 10 ³	1 791.3	81.5	63.2	20.6	15.8	22.8

2.1.4 不同处理水平渗滤液中 DOM 各类别的芳构化程度变化

渗滤液中 HA、FA 和 HyI 部分的 SUVA₂₅₄ 的高低排序(见表 5)为: 循环出水 > 灌溉出水 > 老港原液, 这表明芳构化程度高低依次为: 循环出水 > 灌溉出水 > 老港原液. 循环出水的 SUVA₂₅₄ 较老港原液高, 其原因可能是老港原液中小分子非芳香类物质易在层内循环回灌中的厌氧代谢环节去除, 而芳香类物

质却不易被降解; 灌溉出水 SUVA₂₅₄ 低于循环出水, 这是因为通过终场覆盖层灌溉处理, 去除了大部分中高分子量的 HS, 如去除了循环出水中全部的 HA, 大部分的 FA 和部分较难降解的 HyI(见表 3).

2.2 不同处理水平渗滤液的毒性评价

2.2.1 各渗滤液对小麦种子萌发的影响

以小麦种子为试验材料, 进行渗滤液的种子萌发试验, 老港原液、循环出水、灌溉出水 TOC 分别为

表 5 渗滤液中各 DOM 类别的 $SUVA_{254}/L \cdot (mg \cdot m)^{-1}$

Table 5 $SUVA_{254}$ of HA、FA and HyI from leachates/ $L \cdot (mg \cdot m)^{-1}$

类别	老港原液	循环出水	灌溉出水
HA	2.94	5.15	—
FA	1.34	3.56	2.56
HyI	0.33	1.74	1.48

2 456、354.5 和 71.6 $mg \cdot L^{-1}$ (下同), 对照去离子水 TOC 为 0.2 $mg \cdot L^{-1}$, 结果如表 6 所示. 老港原液及其循环回灌出水对小麦种子的萌发有强烈的抑制作用, 老港原液及其循环回灌出水处理下的小麦种子基本不萌发; 而灌溉出水对小麦种子萌发基本没有抑制作用, 与对照组的萌发率相当, 均为 100%.

表 6 各渗滤液作用下小麦种子萌发率/%

Table 6 Seed germinate rate of wheat exposures to different landfill leachates/%

时间/h	老港原液	循环出水	灌溉出水	对照
24	0	0	100	100
48	0	5	100	100

不同稀释倍数的老港原液、循环出水及灌溉出水稀释液作用下, 小麦种子萌发率(48 h)如表 7 所示. 结果表明, 相同稀释倍数下循环出水萌发率高于老港原液, 稀释 5 倍时, 循环出水萌发率已与灌溉出水及对照组(表 6)相当; 而稀释 10 倍的老港原液种子萌发率仍低于对照组. 这就表明循环回灌和终场覆盖层灌溉可梯级降低渗滤液对小麦种子萌发的抑制作用.

表 7 渗滤液相同倍数稀释液作用下种子萌发率/%

Table 7 Seed germinate rate of wheat exposures to different landfill leachates at the same dilution times/%

稀释倍数	老港原液	循环出水	灌溉出水
2	0	59.1	100
5	36.6	100	100
10	86.6	100	100

2.2.2 各渗滤液对小麦种子幼根生长的影响

各渗滤液对小麦幼根生长的影响如表 8 所示. 结果表明, 老港原液或循环出水直接作用下, 小麦幼根生长受到严重的抑制, 小麦幼根基本不能生长, 且随时间的延长, 可观察到老港原液作用下的小麦幼根发黄、变黑直至全部退化; 而灌溉出水作用下, 小

麦幼根的初期生长速度也不及对照组, 但 96 h 时高于对照组, 表明灌溉出水对小麦幼根生长具有抑制和刺激双重作用, 总体的植物毒性较低.

表 8 渗滤液对小麦幼根生长的影响(根长)/mm

Table 8 Effects of leachate on root length of wheat/mm

时间/h	老港原液	循环出水	灌溉出水	对照
24	3.5	3.5	12.9	16.0
48	3.5	3.5	32.2	39.9
72	3.5	3.5	48.2	62.8
96	3.5	4.0	72.8	66.2

不同稀释倍数的老港原液、循环出水及灌溉出水稀释液对小麦幼根生长的影响见表 9 所示. 结果表明, 相同稀释倍数下, 小麦幼根的生长速度排序为: 灌溉出水 > 循环出水 > 老港原液. 小麦幼根生长试验结果同样表明了循环回灌和终场覆盖层灌溉可梯级降低渗滤液对植物生长的毒害效应. 3 种不同渗滤液的植物毒性差异, 应同它们的有机物、氨氮等浓度差异有关.

表 9 渗滤液相同倍数稀释液作用下幼根生长(根长)/mm

Table 9 Seed germinate rate of wheat exposures to different landfill leachates at the same dilution times/mm

时间/h	老港原液 稀释倍数		循环出水 稀释倍数		灌溉出水 稀释 5 倍
	5	10	5	10	
24	3.5	6.3	6.8	10.6	11.3
48	3.5	7.8	18.6	33.9	31.5
72	3.5	39.8	53.1	78.9	68.6
96	3.5	52.4	62.1	91.6	93.7

3 结论

(1)老港原液、终场填埋覆盖层灌溉出水、填埋层循环回灌出水中溶解性有机物(DOM)占其总有机物的主要部分, 且前 2 种渗滤液中 DOM 组分的 HA、FA、HyI 所占比例依次为: HyI > FA > HA; 而循环出水中: FA > HyI > HA, HS 占多数, 比例达 58.2%. 表明处于稳定产甲烷期的厌氧垃圾填埋层循环回灌可有效去除老港原液中的 HyI, 而终场覆盖层灌溉对循环出水中的 HS 具有良好的去除效果.

(2)老港原液以小分子量有机物为主, 其中 DOM 相对分子质量 10^3 以下占到 81.5%; 而循环回

灌出水的分子量分布范围较广,10⁴ 以上占 45.0%, 4×10³ 以下占 47.2%, 10⁴ ~ 5×10⁴ 间含量最高,达 34.9%;灌溉出水中低分子量有机物占主体,4×10³ 以下占 63%以上,10⁴ 以上约 28%.循环回灌对老港原液中小分子量 HyI 有机物去除效果好,终场填埋覆盖层灌溉处理对循环出水中大分子量的 HS 去除较有效.

(3)循环回灌出水(类似于长填龄渗滤液)的 DOM 主要为 HS,终场填埋覆盖层灌溉处理单元对其 DOM 去除率为 77.4%,且对 HS 类有机物有较好的去除效果,去除率为 85.7%.这表明此处理单元对长填龄渗滤液的处理是有效的.

(4)循环回灌和终场填埋覆盖层灌溉处理单元串联的场内循环处理工艺对老港原液 DOM 去除率高达 96.9%,且对 HS 和 HyI 类有机物均有较好的去除效果,去除率分别为 96.6%、97.0%;2 个处理单元优势互补,克服了单个处理单元对某类有机物去除效果较差的缺点.表明这样的场内处理工艺对处理填埋渗滤液是有效的.

(5)老港原液的植物毒性 > 循环出水 > 灌溉出水,表明循环回灌和终场填埋覆盖层灌溉可梯级降低渗滤液对植物生长的毒害效应.

参考文献:

[1] 薛俊峰,何晶晶,邵立明,等.渗滤液循环回灌厌氧填埋层前

后的分类表征[J]. 水处理技术, 2005, 31(6): 24 ~ 27.
[2] 张晓星,何晶晶,邵立明,等.不同渗滤液循环方式对填埋层甲烷产生的影响[J]. 环境科学学报, 2004, 24(2): 304 ~ 308.
[3] Maurice C, Ettala M, Lagerkvist A. Effects of leachate irrigation on landfill vegetation and subsequent methane emissions[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1999, 113(1/4): 203 ~ 216.
[4] Wong M H, Leung C K. Landfill leachate as irrigation water for tree and vegetable crops[J]. Waste Management & Research, 1989, 7(3): 311 ~ 324.
[5] 姜必亮,王伯荪,蓝崇钰,等.垃圾填埋场渗滤液灌溉对土壤微生物生物量及酶活活性的影响[J]. 环境科学学报, 2001, 21(1): 55 ~ 59.
[6] 姜必亮,王伯荪,蓝崇钰,等.不同质地土壤对填埋场渗滤液的吸收净化效能[J],环境科学, 2000, 21(5): 32 ~ 37.
[7] 薛俊峰.难降解渗滤液溶解性有机物特征分析及其在处理工艺的应用[D].上海:同济大学, 2005.
[8] Thurman E M, Malcolm R L. Preparative isolation of aquatic humic substances[J]. Environ. Sci. Technol., 1981, 15(4): 463 ~ 466.
[9] Christensen J B, Jensen D L, Gron Christian, et al. Characterization of the dissolved organic carbon in landfill leachate-polluted groundwater[J]. Wat. Res., 1998, 32(1): 125 ~ 135.
[10] Li C W, Gregory V K, Mark M B. Monitoring DBP formation with differential UV spectroscopy[J]. Journal of American Water Works Association, 1998, 90(8): 88 ~ 100.
[11] 董秉直,李伟英,陈艳,等.用有机物分子量分布变化评价不同处理方法去除有机物的效果[J]. 水处理技术, 2003, 29(3): 155 ~ 158.