

不同水力负荷渗滤液对植物土壤系统的影响

王如意, 何晶晶*, 邵立明, 袁莉, 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: 以稳定产甲烷阶段垃圾层循环回灌处理后的渗滤液、轻壤土和百慕大草 (*Cynodon dactylon*) 为实验材料, 比较了不同水力负荷渗滤液对植物-土壤系统的生态影响。结果表明, 2.77~12.00 mm·d⁻¹ 渗滤液灌溉组土壤的几种关键酶活性、呼吸作用强度、土壤微生物量、微生物商、叶绿素含量均较对照组高, 丙二醛 (MDA)、过氧化氢 (H₂O₂)、脯氨酸 (Pro) 含量较低; 在渗滤液灌溉组间, 6.46~10.15 mm·d⁻¹ 渗滤液灌溉下百慕大草 Pro 含量下降显著, 叶绿素含量明显提高, 过氧化物酶 (POD) 活性、MDA 和 H₂O₂ 含量较低, 土壤酶活性显著提高、呼吸作用强度、微生物量和微生物商较大; 而当渗滤液水力负荷过低 (2.77~4.16 mm·d⁻¹) 或过高 (12.00 mm·d⁻¹) 时百慕大草胁迫会加重、土壤生物活性下降。表明适量渗滤液灌溉可减缓环境对百慕大草的胁迫, 提高土壤的生物活性, 表现出对植物-土壤系统的生态正效应, 其原因可能与不同水力负荷渗滤液灌溉改变了土壤的水分和理化性质。研究说明, 通过控制渗滤液原液水力负荷, 可望获得渗滤液灌溉对植物-土壤系统最佳的生态效应。

关键词: 渗滤液; 水力负荷; 植物-土壤系统; 生态效应

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)05-0950-06

Ecological Effect of Recirculated Landfill Leachate with Different Hydraulic Loading on Plant-Soil System

WANG Ruyi, HE Pijiang, SHAO Liming, YUAN Li, LI Guojian

(State key laboratory of pollution control and resource reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The ecological effect of irrigating recirculated leachate with different hydraulic loading on bermudagrass (*Cynodon dactylon*) and soil system was evaluated. The results show that leachate irrigation with hydraulic loading of 2.77~12.00 mm·d⁻¹ leads to high chlorophyll content, low proline (Pro) content, as well as low malondialdehyde (MDA) and H₂O₂ content. Soil enzyme activities, respirations, microbial biomass and ratio of biomass carbon to organic carbon (C_{mic}/C_{org}) are rather higher. Among leachate irrigation group, leachate irrigation with hydraulic loading of 6.46~10.15 mm·d⁻¹ leads to declined proline, increased chlorophyll content, low POD activity and low content of MDA and H₂O₂. Soil bio-activity related parameters, such as soil enzyme activities, respirations, microbial biomass and C_{mic}/C_{org} are all enhanced at 6.46~10.15 mm·d⁻¹ of hydraulic loading. However, when hydraulic loading increases to 12.00 mm·d⁻¹ or declines to 2.77~4.16 mm·d⁻¹, the stress of irrigation on bermudagrass is aggravated, and soil bio-activity declines. The results reveal that leachate irrigation could alleviate the stress of environment on bermudagrass and improve the bio-activity of soil. The positive effect of leachate irrigation on the plant-soil system might be contributed to changes of soil water and physico-chemical property after leachate irrigated to the soil. The experimental results suggest that leachate irrigation could benefit plant-soil system, especially when controlled at suitable hydraulic loading.

Key words: recirculated landfill leachate; hydraulic loading; plant-soil system; ecological effect

以甲烷化填埋层循环回灌为核心的生物反应器填埋技术能大幅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长填龄填埋渗滤液, 生物可降解性差、腐殖类物质居多, 氨氮浓度高^[1, 2], 此类渗滤液传统生物处理效果有限, 而物化处理成本高。根据其水质特征, 利用一定控制措施下渗滤液灌溉对植物生长的正效应^[3~5]、土壤生物对渗滤液 COD 和氨氮的去除作用^[6]、以及植物土壤系统的蒸散作用, 可将渗滤液作为植物灌溉水源, 实现渗滤液的净化、减量处理。如借助填埋场最终覆盖层的植物土壤系统进行渗滤液灌溉处理, 还可实现其场内处置的目标。而应用此方法的前提是通过负荷控制来保证渗滤液灌溉对植物土壤系统的生态正效应。

适当浓度渗滤液稀释液灌溉可缓解水分亏缺和供给养分, 改善植物的光合特性、植株水分关系、降低叶片脱落酸含量和促进气孔的开放^[5, 7], 未稀释高浓度渗滤液灌溉会造成活性氧产生和抗氧化系统清除之间的失衡, 导致膜脂过氧化作用加剧, 会加重对禾草的胁迫, 而低浓度渗滤液稀释液灌溉可减缓膜脂过氧化作用, 有利于禾草生长^[8, 9]; 适当稀释渗滤液浇灌能提高土壤微生物量和酶活性, 植物生物

收稿日期: 2005-06-04; 修订日期: 2005-09-27

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2001AA644010, 2003AA644020, 2005AA644010)

作者简介: 王如意 (1975~), 博士研究生, 主要研究方向为固体废物处理及资源化。

* 通讯联系人, E-mail: solidwaste@mail.tongji.edu.cn

量也增大,且植物根系能促进微生物活性^[10~12].上述结果对于揭示渗滤液对植物土壤作用和效应的机理有重要意义,但研究结果都出于相同灌溉水力负荷(水量)下,渗滤液不同稀释条件的研究,不同水力负荷渗滤液原液灌溉的研究报道甚少;而填埋场缺乏稀释水源,稀释灌溉方式实用性差,同时,灌溉水力负荷对土壤的水分、有效孔隙率等物理条件的影响可能造成渗滤液灌溉生态效应的差异,因此,有必要研究渗滤液原液不同水力负荷灌溉对植物土壤系统的生态效应.本研究通过对不同水力负荷渗滤液灌溉作用下的土壤理化、生物学指标,其上生长的植物生理生化指标变化规律的比较研究,为探讨渗滤液对植物土壤系统的生态效应,确定渗滤液在填埋场终场覆盖层灌溉处理的水力负荷参数提供依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物为百慕大草(*C. dactylon* cv. *Dol sol*);土壤为轻壤土,取自上海,有机质 1.73%,全氮 0.048%,全磷 0.052%,pH 8.33;实验用渗滤液取自上海老港垃圾填埋场调节池(COD 6 000~15 000 mg·L⁻¹、NH₃-N 600~2 000 mg·L⁻¹,B/C 0.2~0.3),并经实验室处于稳定产甲烷阶段的垃圾填埋柱(填龄 2 年)循环回灌处理后的出水,具有类似长填龄填埋场渗滤液水质特征^[1,2],灌溉期间其理化性质见表 1.

表 1 实验用渗滤液的水质特征/mg·L⁻¹

Table 1 Characteristics of recirculated landfill leachate/mg·L⁻¹

指标	范围	指标	范围
pH	8~9	K	581~652
COD	593~1 112	Ca	7.12~19.77
BOD ₅	48~107	Mg	45.99~51.09
NH ₃ -N	509~905	Cu	0.017 2~0.043 0
NO ₃ ⁻ -N	5~30	Zn	0.121 1~0.175 3
TP	1.7~2.8	Pb	0.030 4~0.077 7
EC×10 ³ /μS·cm ⁻¹	21.6~30.2	HA/TOC	0.047~0.072
Cl ⁻	605~2 112	FA/TOC	0.438~0.586
Na	694~869	HyI/TOC	0.352~0.491

1.2 盆栽实验

百慕大草籽 20 g·m⁻²播入上口直径 26 cm、下口直径 20 cm、深 26 cm 塑料盆.其底部开有出水孔,出水孔上为 1.5 cm 厚陶粒层和 0.5 cm 厚土工布,实际土深为 22 cm;土盆悬吊于自制的实验板台中,仅有盆口暴露于日光下;试验设 6 组渗滤液灌溉组,每组 3 次重复,渗滤液灌溉水力负荷分别为 2.77、4.62、6.46、8.31、10.15、12.00 mm·d⁻¹,同时

设对照组灌溉清水模拟自然降雨,根据上海市近年降雨量年平均值 1 036 mm,固定水力负荷为 2.83 mm·d⁻¹.

1.3 采样

百慕大草出苗后 1 个月浇灌适量清水或渗滤液稀释液,以让其适应成活,7 月起按设计的水力负荷灌溉渗滤液原液,原液清晨一次灌入盆中;分别于原液灌溉后 1 个月、3 个月和 5 个月对百慕大草进行采样;清晨,选择有代表性的新鲜植株叶片,称取定量进行生理生化指标的测定,渗滤液灌溉后 5 个月采集各组混合土样进行土壤理化和生物学分析.

1.4 植物生理生化指标测定

叶绿素用 80% 丙酮提取,分光光度法测定;丙二醛(MDA)含量以硫代巴比妥酸(TBA)法测定;茛三酮比色法测定脯氨酸(Pro)含量^[13];过氧化氢(H₂O₂)含量采用林植芳的比色法测定^[14];过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定,以每 min A₄₇₀变化 0.01 为 1 个过氧化物酶活力单位(U),活性以 U·(min·g)⁻¹表示^[13].

1.5 土壤理化和生物学指标测定

土壤 pH(土水比 1:2.5),土壤有机质含量、土壤养分含量等按常规方法测定.土壤转化酶活性用硝基水杨酸比色法,活性单位以每 g 土样 24 h 产生的葡萄糖量表示;脲酶活性用靛酚比色法比色法,活性单位以每 g 土样 24 h 产生的 NH₄⁺-N 量表示;磷酸酶活性用磷酸苯二钠法,活性单位以每 g 土样 2 h 产生的 P₂O₅ 量表示;过氧化氢酶用 KMnO₄(0.025 mol·L⁻¹)滴定法,活性单位以每 g 土样 20 min 消耗的 KMnO₄ 量表示^[15].脱氢酶用红四氮唑还原法,活性单位以每 g 土样 12 h 产生的 TF 量表示^[16].土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸法,TOC 仪测定 K₂SO₄ 提取液 C^[17],土壤呼吸强度采用碱吸收滴定法,单位以每 g 土样每 h 产生的 CO₂ 量表示^[18].

1.6 数据处理

试验数据用统计学方法进行处理,统计分析各因子之间的相关性.实验组组间进行显著性的 *t*-检验,*p* < 0.05,被认为差异显著,*p* < 0.01 差异极显著;数据结果表示为平均值±标准偏差.

2 结果与分析

2.1 渗滤液对土壤理化性质的影响

不同水力负荷渗滤液灌溉后土壤理化性质如表 2 所示,和对照组相比,渗滤液灌溉增加了土壤中的有机质、氮、磷、钾等各种营养元素,同时也增加了金

属盐和重金属元素含量. 渗滤液灌溉组随水力负荷的提高, 土壤中元素含量增加幅度先增大后减小, 6.46 8.31 mm•d⁻¹组增加幅度较大; 而不同水力负荷渗滤液灌溉下各元素积累差异应是由渗滤液浇灌

表 2 不同水力负荷渗滤液灌溉对土壤理化性质的影响

Table 2 Selected physical and chemical characteristics of soil receiving different hydraulic loading leachate

水力负荷 / mm•d ⁻¹	pH	有机质 / g•kg ⁻¹	全氮 / g•kg ⁻¹	全磷 / g•kg ⁻¹	全钾 / g•kg ⁻¹	Na / g•kg ⁻¹	Ca / g•kg ⁻¹	Mg / g•kg ⁻¹	Cu / mg•kg ⁻¹	Pb / mg•kg ⁻¹
CK	8.46	17.4	0.55	0.48	16.27	14.04	6.52	7.07	36.96	31.15
2.77	8.70	18.2	0.70	1.23	19.36	14.88	9.40	8.84	54.02	48.91
4.62	8.87	22.7	0.87	1.30	20.34	15.99	9.91	9.25	65.67	59.47
6.46	8.76	20.3	0.88	1.49	19.48	15.72	11.12	9.12	63.44	65.39
8.31	9.07	23.9	1.10	1.56	21.02	16.28	10.97	10.09	56.18	80.38
10.15	8.88	21.6	0.93	1.21	21.23	15.52	8.62	7.96	54.65	45.43
12.00	8.80	21.2	0.93	1.26	19.28	15.45	8.41	8.04	52.74	44.62

量的差异、百慕大草生物量的差异及与之相应的渗滤液蒸散量、植物吸收量的差异造成的.

2.2 不同水力负荷渗滤液对土壤生物学性质影响

2.2.1 渗滤液对土壤酶活性影响

土壤代谢与土壤酶密切相关, 代谢反应一般为酶促反应, 而且受外界环境因素和土壤内部环境因素的影响和调节, 土壤酶活性是表征土壤肥力、受污染状况的重要指标. 由表 3 可知, 除脲酶外, 渗滤液灌溉组土壤酶活性、呼吸作用强度均显著高于对照组($p < 0.05$ 或 $p < 0.01$), 表明适量渗滤液灌溉可提高土壤的生物活性. 渗滤液灌溉组间, 随水力负荷的提高, 几种土壤关键酶活性均先升高, 至 8.31 或 10.15 mm•d⁻¹后下降; 8.31~12.00 mm•d⁻¹灌溉组转化酶活性显著高于 2.77~6.46 mm•d⁻¹组; 10.15 mm•d⁻¹组磷酸酶活性显著高于其它组

($p < 0.01$); 8.31 mm•d⁻¹组脲酶活性较高, 其余组间差异不显著; 过氧化氢酶活性各组间差异不显著; 脱氢酶活性对照组显著低于除 2.77 mm•d⁻¹组外的渗滤液灌溉组, 8.31 和 10.15 mm•d⁻¹组显著高于 2.77 mm•d⁻¹组; 除过氧化氢酶外, 2.77 mm•d⁻¹组酶活性均显著低于各酶活性最大的水力负荷组($p < 0.05$ 或 $p < 0.01$). 8.31~12.00 mm•d⁻¹灌溉组呼吸作用强度显著高于 2.77~6.46 mm•d⁻¹组($p < 0.01$), 但水力负荷高于 8.31 mm•d⁻¹后呼吸作用强度变小(表 3). 呼吸作用强度是评价污染物对土壤微生物生态效应的重要指标, 其大小通常与土壤微生物的总量和活性有关. 实验结果表明, 过高水力负荷渗滤液灌溉会降低土壤微生物活性.

2.2.2 渗滤液对土壤生物量及微生物商的影响

表 3 不同水力负荷渗滤液灌溉下土壤酶活性

Table 3 Activities of soil enzymes treated with different hydraulic loading landfill leachate

水力负荷 / mm•d ⁻¹	转化酶 / mg•g ⁻¹	脲酶 / mg•g ⁻¹	磷酸酶 × 10 ⁻² / mg•g ⁻¹	过氧化氢酶 / mL•g ⁻¹	脱氢酶 / μg•g ⁻¹	呼吸作用强度 × 10 ⁻³ / mg•g ⁻¹
CK	9.99 ± 0.22	0.301 6 ± 0.009 1	4.32 ± 0.24	0.013 2 ± 0.001 3	189.78 ± 18.64	1.894 ± 0.085
2.77	10.84 ± 0.96	0.289 8 ± 0.021 1	4.98 ± 0.59	0.015 9 ± 0.000 6	253.91 ± 38.42	4.305 ± 0.035
4.62	11.02 ± 4.14	0.312 8 ± 0.008 1	5.90 ± 0.30	0.018 4 ± 0.003 4	318.99 ± 23.36	4.495 ± 0.233
6.46	12.98 ± 3.77	0.293 5 ± 0.003 6	8.31 ± 0.26	0.016 2 ± 0.000 3	326.92 ± 14.35	4.731 ± 0.099
8.31	23.61 ± 5.65	0.340 0 ± 0.001 0	8.75 ± 0.35	0.021 4 ± 0.003 4	381.16 ± 20.39	6.964 ± 0.071
10.15	20.71 ± 0.74	0.284 8 ± 0.010 1	15.81 ± 0.72	0.020 6 ± 0.003 2	366.59 ± 10.76	6.815 ± 0.276
12.00	18.55 ± 2.38	0.305 7 ± 0.011 1	7.86 ± 0.56	0.019 2 ± 0.001 9	317.34 ± 21.99	6.772 ± 0.057

微生物转化土壤碳素和无机营养元素形成微生物量, 土壤微生物生物量是反映土壤质量和生物活性的重要指标之一^[19]. 图 1 表明, 渗滤液灌溉下土壤微生物生物量碳显著高于对照组, 随水力负荷增大生物量碳先增大后减小, 2.77 mm•d⁻¹组微生物碳量显著低于其它水力负荷组, 而高水力负荷 12.00 mm•d⁻¹作用下微生物碳量也显著低于 6.46

~10.15 mm•d⁻¹组, 体现了过量渗滤液的负效应. 微生物商是指土壤微生物生物量碳与土壤有机碳总量的比值, 用来表示土壤质量的变化, 比单独应用微生物生物量碳要有效, 因它可避免有机质含量不同的土壤进行比较时结果的差异^[20]. 渗滤液灌溉组土壤微生物商均高于对照组, 除 2.77、12.00 mm•d⁻¹组外差异显著(图 1); 渗滤液灌溉组间,

6.46 mm·d⁻¹组的微生物商最大,且显著高于对照组 2.77 和 12.00 mm·d⁻¹组,其余组间有差异但不显著。结果表明,适量水力负荷渗滤液灌溉能提高土壤微生物生物量碳和微生物商。

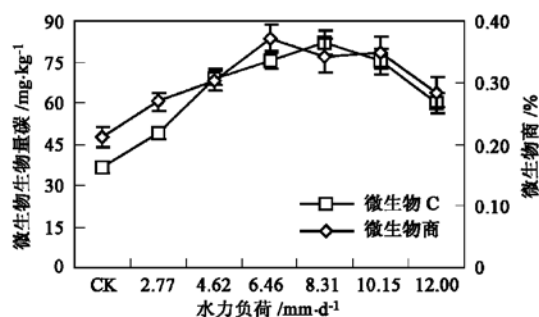


图 1 不同水力负荷渗滤液灌溉对土壤微生物量及商的影响

Fig. 1 Changes of soil microbial biomass and Cmic/Corg receiving different hydraulic loading leachate

2.3 不同水力负荷渗滤液对百慕大草的生态效应

2.3.1 渗滤液对叶绿素含量的影响

渗滤液灌溉组百慕大草叶绿素含量均高于对照组,且随水力负荷的增加先增加,至一定水力负荷后转而下降(图 2a);1 个月时 10.15 mm·d⁻¹组叶绿素含量最高且显著高于对照组、2.77 和 12.00 mm·d⁻¹组,4.62~10.15 mm·d⁻¹各组间差异不显著;而 3 5 个月时 8.31、6.46 mm·d⁻¹组叶绿素含量分别最高且显著高于对照组和其余渗滤液灌溉组;各时间点叶绿素含量高低顺序依次为 1 个月、3 个月、5 个月。百慕大草为暖季型草,季节性时间效应造成了它的自然生长和衰老过程,3、5 个月时对应为百慕大草生长季后期,自然衰老导致了叶绿素含量的下降。叶绿素为光合色素,可见渗滤液灌溉有利于百慕大草的光合作用,从而有利于其生长,且控制适量水力负荷效果更佳;这应归因于适量水力负荷渗滤液灌溉提供了适量的水分,同时也改善了土壤的营养状况(表 2)。

2.3.2 渗滤液对丙二醛含量的影响

渗滤液灌溉 1 个月时,对照组丙二醛(MDA)含量最高,8.31 mm·d⁻¹组最少,二者间差异显著,渗滤液灌溉组间 MDA 含量差异不显著(图 2b);3 个月时对照组和 2.77 mm·d⁻¹组 MDA 积累显著高于其它组,6.46、8.31 mm·d⁻¹组显著低于其它组;5 个月时 4.62、6.46、8.31 mm·d⁻¹组 MDA 含量显著低于其它组。各时间点 MDA 含量高低顺序依次为 3 个月、1 个月、5 个月,和叶绿素相似,季节性的时间效应造成了此差异。MDA 为膜脂过氧化的产物,是

反映生物体膜系统受伤害的重要指标之一;植物在逆境胁迫或衰老过程中,细胞过剩自由基毒害导致了 MDA 的积累^[22],渗滤液灌溉下的 MDA 变化应同活性氧自由基的变化密切相关。整个生长季中随水力负荷增大,百慕大草 MDA 先减小后增大,4.62~8.31 mm·d⁻¹组 MDA 积累相对较少,这表明适量渗滤液灌溉可减缓膜脂过氧化作用,从而减缓环境对百慕大草的胁迫。

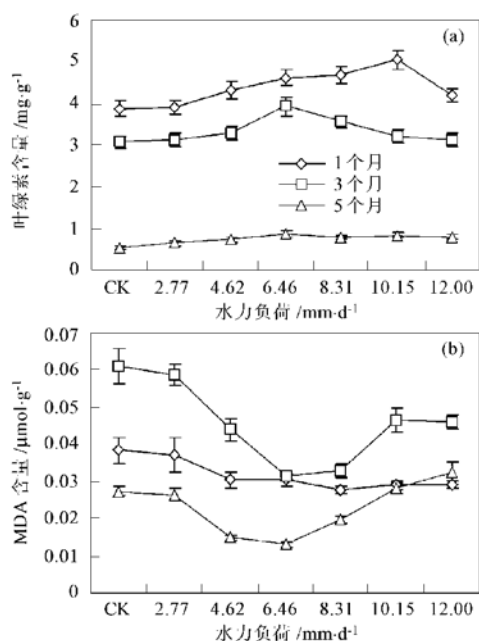


图 2 不同水力负荷渗滤液灌溉下百慕大草叶绿素(a)和丙二醛(b)含量变化

Fig. 2 Changes of bermudagrass chlorophyll (a) and MDA (b) content treated with different hydraulic loading leachate

2.3.3 渗滤液对脯氨酸含量的影响

脯氨酸(Pro)为反映水分亏缺和盐胁迫的指标,植物体内 Pro 含量的增加是植物对逆境胁迫的一种生理生化反应^[21];渗滤液灌溉既给百慕大草提供了水分,同时也带来了盐分,气温较高且百慕大草生长旺盛时低水力负荷下的水量可能不能完全满足植物生长的需要,会导致水分亏缺从而产生 Pro 积累,而高水力负荷下的 Pro 积累可能是对植物体内盐累积的反应。实验结果表明(图 3a),渗滤液灌溉 1 个月时百慕大草 Pro 含量随水力负荷的增大先减小后增大,对照组和 2.77 mm·d⁻¹组 Pro 含量显著高于其它组($p < 0.01$),而 8.31 mm·d⁻¹组 Pro 含量显著低于其它组;3 个月时对照组 Pro 含量最高,且对照组、2.77 和 4.62 mm·d⁻¹3 组 Pro 积累显著高于其它组($p < 0.01$),3 个月时正值 10 月初,此时因气温

较高且百慕大草生物量较大,故对水分需求较高,水分亏缺导致了低水力负荷 2.77、4.62 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 组百慕大草的 Pro 积累;5 个月时各组间无显著性差异但对照组含量较低,渗滤液灌溉组间水力负荷越高,Pro 积累越多,此时为 12 月初,正值百慕大草生长末期且气温较低,对水分需求较小,不会发生水分亏缺,Pro 积累应是对渗滤液中盐分胁迫的应激反应,渗滤液水力负荷越大,Pro 积累较多。

2.3.4 渗滤液对 H_2O_2 含量的影响

随水力负荷的提高,百慕大草 H_2O_2 含量均呈先降低后升高的趋势(图 3b);1、3 个月时 12.00 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 组 H_2O_2 含量最高且显著高于其它组,对照组 2.77 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 组较高,而 8.31 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 组 H_2O_2 含量最低;5 个月时 6.46 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 组 H_2O_2 含量最低,对照组和 2.77 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 组 H_2O_2 含量显著高于其它组($p < 0.01$); H_2O_2 是对植物具毒害作用的一种活性氧,可抑制 SOD 等酶类的活性,参与叶绿素的降解,降低叶绿体的抗坏血酸含量,引起膜脂质过氧化,加速叶片的衰老^[14,22]。结果表明,渗滤液灌溉的胁迫伤害可能与活性氧引起的氧化胁迫有关,同时也表明适量渗滤液灌溉会减缓氧化胁迫。

2.3.5 渗滤液对 POD 活性的影响

渗滤液灌溉组 POD 活性均高于对照组(图 3c);渗滤液灌溉组间 1、3 个月时 POD 活性均呈先降低后升高的趋势;1 个月时 4.62 和 6.46 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 组 POD 活性较低,且显著低于 2.77 和 12.00 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 组;3 个月时 8.31 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 组 POD 活性显著低于除 6.46 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 外的灌溉组;5 个月时 POD 活性随灌溉负荷先升高后降低,6.46 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 组 POD 活性最强,12.00 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 组 POD 活性显著低于其它水力负荷组($p < 0.01$),而其余组间差异并不显著。POD 活性的上升是植物对逆境的适应性反应,可作为鉴别污染物对植物毒性及其临界含量的指标^[22],先前的研究也表明,禾草 POD 对渗滤液胁迫的敏感性较强^[8,9],POD 的变化规律也表明了过低或过高水力负荷渗滤液灌溉会对百慕大草产生逆境胁迫。

3 讨论

和对照组相比,2.77~12.00 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 渗滤液灌溉均减缓了对百慕大草胁迫,提高了土壤生物活性;但不同水力负荷下的程度不同,6.46~10.15 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 负荷的胁迫减轻和生物活性提高较为显著,与之相比,水力负荷过低(2.77~4.16 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)

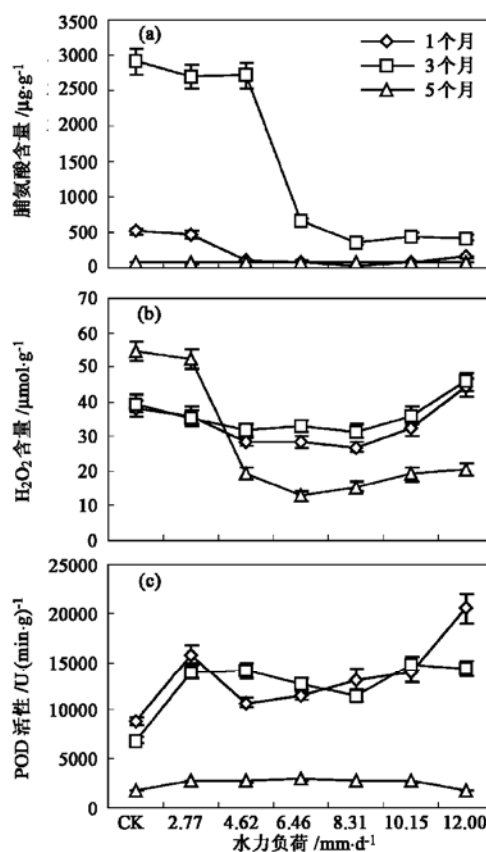


图 3 不同水力负荷渗滤液灌溉下百慕大草脯氨酸(a)含量、 H_2O_2 含量(b)和 POD 活性(c)变化

Fig. 3 Changes of praline (a), H_2O_2 content (b) and POD activity (c) irrigated with different hydraulic loading leachate

或过高(12.00 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) 则有更大的胁迫效应和较低的生物活性,说明只有在合理的水力负荷下,渗滤液灌溉对植物土壤系统才有较好的生态效应。渗滤液灌溉水力负荷对植物土壤系统生态效应影响的机制的可能在于,灌溉后各组土壤中水分、植物营养成分含量的差异;表 2、3 表明 6.46~10.15 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 组土壤中植物营养成分含量较多,肥力水平较高;良好的水分和营养状况可减缓环境对植物的胁迫,有利于植物的光合作用及生物质的合成和累积^[23,24]。土壤水分对于维持土壤的生物活性有重要作用,水分亏缺严重时土壤微生物会处于休眠状态,土壤生物活性必然下降;同时良好的土壤养分供给对于保持土壤一定生物活性具有重要的积极作用^[25,26]。

经稳定产甲烷阶段的垃圾层循环回灌处理后的渗滤液水质类似长填龄渗滤液,腐殖类生物难降解物质含量高、氨氮浓度高,也含有多种营养元素和某些有毒物质(表 1);其水质特点表明高浓度盐、氯离子和氨氮可能为对植物土壤系统的不利因子^[4],利

用此类渗滤液作为灌溉水源时,在利用水分和营养物质的同时,也要将不利因子的剂量控制在一定水平下。长填龄渗滤液 50% 稀释液浇灌后土壤微生物生物量最大,土壤酶活性与呼吸强度也表现出类似的变化^[10]; $12.00 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 原液水质相同的渗滤液、大于 25% 稀释液灌溉下,随稀释比增大,百慕大草膜脂过氧化水平提高,负效应增强^[8]。通过渗滤液稀释的方式可达到灌溉生态正效应的目的,而本文的结果表明渗滤液不经稀释,通过控制渗滤液的水力负荷同样可达到生态正效应的目的,这对渗滤液资源化利用作为灌溉水源时的实施方式有参考意义;同时 $6.46 \sim 10.15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 可作为确定渗滤液填埋场最终覆盖层灌溉处理水力负荷的参考依据。

4 结论

(1) 类长填龄渗滤液灌溉条件下,和对照组相比, $2.77 \sim 12.00 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 渗滤液灌溉均减缓了百慕大草的胁迫反应,提高了土壤生物活性;表明一定水力负荷渗滤液灌溉对植物土壤系统是有利的。

(2) $6.46 \sim 10.15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 渗滤液灌溉减轻植物胁迫和提高土壤生物活性的效应较为显著,与之相比,水力负荷过低 ($2.77 \sim 4.16 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 或过高 ($12.00 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 则有相对更大的胁迫效应和较低的生物活性;表明只有在合理的水力负荷下,渗滤液灌溉对植物土壤系统才有较好的生态效应。

(3) $6.46 \sim 10.15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 渗滤液不经稀释直接灌溉对植物土壤系统也具有较好的生态效应,表明可采取控制渗滤液水力负荷的实施方式,同时,此参数也可作为确定渗滤液填埋场最终覆盖层灌溉处理的水力负荷参考依据。

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] 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.
- [4] 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.
- [5] 梁建生,张建华,陈玉成,等. 垃圾堆填区渗出液对干旱季节树苗生长的影响[J]. 应用与环境生物学报, 1999, **5**(3): 240~ 246.
- [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] Shrive S C, McBride R A, Gordon A M. Photosynthetic and growth responses of two broad-leaf tree species to irrigation with municipal landfill leachate[J]. Environmental Quality, 1994, **23**(4): 534~ 542.
- [8] 王如意,何晶晶,邵立明,等. 渗滤液灌溉对香根草胁迫及抗氧化系统的影响[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(2): 155~ 159.
- [9] 王如意,何晶晶,邵立明,等. 填埋场渗滤液尾水灌溉对百慕大草抗氧化系统的影响[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(5): 933~ 938.
- [10] Groden A M, McBride R A, Fiskin A J, et al. Effects of landfill leachate spraying on soil respiration and microbial biomass in a northern hardwood forest ecosystem[J]. Waste Management & Research, 1988, **6**: 141~ 148.
- [11] 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性的影响[J]. 环境科学学报, 2001, **21**(1): 55~ 59.
- [12] 姜必亮,蓝崇钰,王伯荪. 垃圾填埋场渗滤液灌溉后重金属的生态效应[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(1): 18~ 23.
- [13] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990. 88~ 91. 154~ 155.
- [14] 林植芳,李双顺,林桂珠,等. 衰老叶片和叶绿体中 H_2O_2 的累积与膜脂过氧化化的关系[J]. 植物生理学报, 1988, **14**(1): 16~ 22.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 274~ 276. 294~ 298. 310~ 313. 323.
- [16] 朱南文,胡茂林. 乐果对土壤中酶活性和微生物数量的影响[J]. 上海环境科学, 1997, **16**(4): 43~ 45.
- [17] Vance E D, Brooks P C, Jenkinson D S. An extraction method for measure soil microbial biomass C [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1987, **19**(6): 703~ 707.
- [18] 许光辉,郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 226~ 227.
- [19] Jimenez M D, de la Horra A M, Pruzzo L, et al. Soil quality: a new index, based on microbiological and biochemical parameters[J]. Biology & Fertility of Soils, 2002, **35**(4): 302~ 306.
- [20] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of change in soil organic matter [J]. Australian Journal of Soil Research, 1992, **30**(2): 195~ 207.
- [21] Smirnov N. The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation[J]. New Phytologist, 1993, **125**(1): 27~ 58.
- [22] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J]. 植物生理学通讯, 1991, **27**(2): 84~ 91.
- [23] 蒋明义,荆家海,王韶唐. 水分胁迫与植物膜脂过氧化[J]. 西北农业大学学报, 1991, **19**(2): 88~ 94.
- [24] 吴楚,王政权,范志强,等. 不同氮浓度和形态比例对水曲柳幼苗叶绿素合成、光合作用以及生物量分配的影响[J]. 植物生态学报, 2003, **27**(6): 771~ 779.
- [25] 杨长明,杨林章,王韶唐,等. 不同养分和水分管理模式对水稻土质量的影响及其综合评价[J]. 生态学报, 2004, **24**(1): 63~ 69.
- [26] Zimmermann S, Frey B. Soil respiration and microbial properties in an acid forest soil: effects of wood ash[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, **34**(11): 1727~ 1737.