

水力负荷对生物滤池中蚯蚓抗氧化酶和消化酶活性的影响

杨健¹, 赵丽敏^{1*}, 陈巧燕², 邓德汉¹, 易当皓¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海市南汇区申港街道办事处, 上海 201313)

摘要:通过工况试验考察了不同水力负荷条件对生物滤池中蚯蚓的抗氧化酶(超氧化物歧化酶、过氧化氢酶)和消化酶(纤维素酶、碱性磷酸酶)活性的影响. 结果表明, 蚯蚓体内抗氧化酶和消化酶活性对水力负荷胁迫的响应不同. 在 $2.4\sim 6.7\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 的水力负荷条件下, 蚯蚓体内的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性随水力负荷的增大而增强, 蚯蚓通过自身抗氧化系统的协调作用来抵御外界环境胁迫, 在各工况条件下均能生存. 蚯蚓体内消化酶活性和其消化能力、滤池污泥减量和稳定化效果具有很好的相关性($p < 0.05$). 水力负荷为 $4.8\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 时, 蚯蚓具有较高的碱性磷酸酶(AKP)和纤维素酶(FP)活性, 消化率(41.47%)显著高于其他工况, 污泥减量率、污泥有机质分解率均达到最高值, 分别为48.2%、65.5%. 高水力负荷[$\geq 6.0\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]对蚯蚓体内 AKP、FP 活性抑制较显著, 污泥的代谢水平受到影响, 污泥减量率和有机质分解率均有一定程度下降, 不利于蚯蚓生态功效的发挥. 综合蚯蚓抗氧化酶及消化酶的响应结果, 蚯蚓生物滤池运行水力负荷不宜超过 $6.0\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.

关键词:蚯蚓生物滤池; 水力负荷; 抗氧化酶; 消化酶

中图分类号: X505 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)04-1029-07

Effect of Hydraulic Loading on Antioxidant Enzyme and Digestive Enzyme Activities of Earthworm in Biofilter

YANG Jian¹, ZHAO Li-min¹, CHEN Qiao-yan², DENG De-han¹, YI Dang-hao¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shengang Street Office Nanhui District, Shanghai 201313, China)

Abstract: Through different working condition experiments, effect of hydraulic loading on antioxidant enzyme (superoxide dismutase, catalase) and digestive enzyme (cellulose, alkaline phosphatase) activities of earthworm in biofilter were studied. The results indicated that antioxidant enzyme and digestive enzyme activities of earthworms responded to hydraulic loading stresses differently. SOD and CAT activities of earthworms increased with the increase of hydraulic loading in the scale of $2.4\sim 6.7\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, earthworms resisted external environmental stress by coordination function of antioxidation system, so they could survive in different conditions. In addition, digestive enzyme activity, digest ability, sludge reduction and stabilization effect showed excellent correlation ($p < 0.05$). When the hydraulic loading was $4.8\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, earthworm biofilter showed a high level of AKP, FP and digest rate (41.47%), which was notably better than that of other conditions, sludge and organic matter reduction rate came to the maximum, 48.2% and 65.5% respectively. However, higher level of hydraulic loading [$\geq 6.0\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$] restrained AKP and FP activity markedly and metabolism level was affected, sludge reduction rate had certain decadence, so it was unfavorable for earthworm biofilter to bring the ecological function into play. At last it is recommended that the hydraulic loading of earthworm biofilter should not exceed $6.0\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.

Key words: earthworm biofilter; hydraulic loading; antioxidant enzyme; digestive enzyme

蚯蚓生物滤池是一种新型的污水处理技术^[1,2], 采用现代生态设计理念, 在污水处理反应器中引入蚯蚓, 延长和扩展了原有的微生物代谢链. 在此生态系统中, 微生物以污水中的胶体态和溶解性有机物为食料, 并在滤料颗粒表面形成生物膜, 而滤床中的蚯蚓主要以生物膜污泥作为营养源, 利用自身丰富的消化酶系统将有机物迅速分解、转化成自身和其他生物易于利用的营养物质及少量的排泄物, 在污水处理过程中同步实现污泥的减量化和稳定化^[3,4]. 蚯蚓的生长环境不同, 自身的代谢水平也不同.

蚯蚓在饲养场以腐熟牛粪为食料, 主要受温度、降水等自然因素影响, 人为机械干扰较少. 蚯蚓投入滤池后, 食料改为截留的生物膜污泥, 受自然因素影响外, 水力负荷成为决定其生存状况的主要的人为因素. 连续不断进水使滤床中含水率远大于蚯蚓初始生存环境, 强烈的机械干扰也使原本“喜安静”的

收稿日期: 2008-05-26; 修订日期: 2008-07-14

基金项目: 国家科技支撑计划世博科技专项(2007BAK27B05)

作者简介: 杨健(1953~), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为污水处理与资源化, E-mail: yishu@online.sh.cn

* 通讯联系人, E-mail: mumu5588@sohu.com

蚯蚓生存受到胁迫. 蚯蚓生长的特殊环境会迫使其体内的抗氧化酶呈现一定的应激变化. 抗氧化酶对非常规环境或污染物胁迫相当敏感, 其活性变化可为环境或污染物胁迫下的机体氧化应激提供敏感信息^[5,6]. 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)是其中最具有代表性的^[7].

蚯蚓作为陆地上生物量最大的一类土壤动物^[8], 且被认为是用于进行化学物质生态毒理学试验的合适陆生生物^[9,10]. 重金属、农药、杀虫剂、除草剂等污染物胁迫对蚯蚓的酶活性, 尤其是抗氧化酶, 研究报道较多^[11~14], 而关于非常规环境, 例如蚯蚓滤池这一特殊环境对蚯蚓酶活性胁迫的影响尚鲜见报道.

本研究比较了不同水力负荷胁迫下, 滤池中蚯蚓和受相同自然因素影响的人工养殖蚯蚓的消化酶(碱性磷酸酶和纤维素酶)以及抗氧化酶(SOD和CAT)活性的变化, 从生理学角度评价蚯蚓生物滤池污水处理过程中, 蚯蚓同步进行污泥分解的效率, 以及非常规环境中, 蚯蚓抵抗逆环境胁迫的能力, 以期为确定和优化滤池的运行工况提供参考和依据.

1 材料与方 法

1.1 试验装置和供试材料

蚯蚓生物滤池呈圆柱体(见图1), 自然通风, 直径3.7 m, 高1.28 m, 填料层高0.2 m, 装填3~5 mm 陶粒滤料, 陶粒堆积密度 $0.90 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 比表面积 $12 \text{ m}^2/\text{g}$, 孔隙率52%. 滤池采用旋转布水器连续布水. 陶粒表面铺一层塑料纤维填料, 可二次布水, 其水力缓冲作用也使蚯蚓有效避免水力冲刷的机械伤害.

供试蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*), 该蚯

蚓繁殖能力强、易驯化, 可在高含水量基质中生存, 广泛用于环境污染生态治理中. 试验初期, 滤池共投加蚯蚓约20万条, 蚯蚓平均体重0.132 0 g.

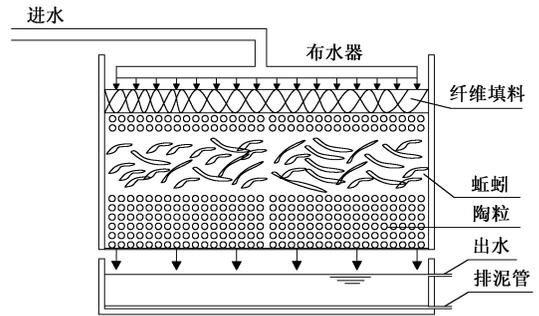


图1 蚯蚓生物滤池构造示意

Fig. 1 Schematic diagram of earthworm biofilter

对照试验: 与中试装置工况试验同步, 在室外, 用腐熟牛粪为参照食料对蚯蚓进行人工饲养, 试验地点选在中试装置附近, 保证其和滤池中蚯蚓受到同样的降水和温度等自然因素的影响. 腐熟牛粪取自郊区某奶牛厂.

1.2 试验工况及进水条件

生物滤池中试装置设在上海某城市污水处理厂内, 处于“厌氧水解-高负荷生物滤池-蚯蚓生物滤池”组合工艺的末端. 组合工艺总进水为合流制城市污水, 蚯蚓生物滤池进水为高负荷生物滤池出水.

对蚯蚓进行2个月的驯化后, 滤池稳定运行, 开始工况试验, 4个工况于2006年5~8月在温度条件相近的情况下进行, 每个工况历时1个月左右, 通过改变生物滤池的流量(1.0~2.8 m³/h), 考察不同水力负荷胁迫对蚯蚓酶活性的影响, 各工况蚯蚓滤池进水水质及运行参数见表1.

表1 蚯蚓生物滤池进水水质及运行参数

Table 1 Influent quality of earthworm biofilter

工况	日期	进水温度 / °C	进水 pH	进水 DO / mg·L ⁻¹	水力负荷 / m ³ ·(m ² ·d) ⁻¹	COD / mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N / mg·L ⁻¹	SS / mg·L ⁻¹	BOD ₅ / mg·L ⁻¹
1	2006-05-01~2006-05-31	17.5~22.8	7.27~7.79	4.6~5.33	2.4	63.82~99.80	5.94~27.12	22.3~52.3	31~44
2	2006-06-01~2006-06-30	21.5~27.8	7.47~7.90		4.8	48.83~103.79	8.62~29.16	14.6~40.5	24~42
3	2006-07-01~2006-07-31	26.0~28.5	7.45~7.97		6.0	43.65~89.84	8.29~21.68	13.8~37.2	14~42
4	2006-08-01~2006-08-31	27.2~28.6	7.59~7.89		6.7	42.47~75.75	14.57~21.70	14.8~45.4	29~38

1.3 测定方法

1.3.1 水质指标

蚯蚓生物滤池进、出水 COD、NH₄⁺-N、SS、TN 和 TP 的测定参照文献[15], DO 测定采用 WTW Oxi330 溶氧仪, BOD₅ 测定采用 Merck BOD₅ 测试仪.

1.3.2 生物膜污泥和牛粪指标

污泥和牛粪 pH 值、有机质(OM)、有机碳、TN、TP、TK(总钾)的测定以及污泥纤维素含量的测定参照文献[16].

1.3.3 蚯蚓酶活性的测定

SOD 活性: 采用黄嘌呤氧化法^[17], 根据 SOD 抑制氧化羟胺形成的亚硝基盐紫红光的性质测定, 以

每 mg 蚯蚓组织蛋白在 1 mL 反应液中 SOD 抑制率达 50% 时所对应的 SOD 量为一个活力单位(U).

CAT 活性: 采用紫外分光法^[18]. CAT 分解 H_2O_2 的反应可用钼酸铵迅速中止, 通过测定剩余钼酸铵与 H_2O_2 作用产生黄色络合物的生成量计算 CAT 活力. 以每 mg 蚯蚓组织蛋白每秒钟分解 1 μ mol 的 H_2O_2 量为一个活力单位(U).

AKP(碱性磷酸酶)活性测定参照文献[19]. AKP 分解磷酸苯二酸, 产生游离酚和磷酸. 酚在碱性溶液中与 4-氨基安替吡啉作用经氰化钾氧化生成红色醌衍生物, 根据红色深浅可测定酶活力. 以每 g 蚯蚓组织蛋白在 37℃ 与基质作用 15 min 产生 1 mg 酚为一个活力单位(U).

FP(纤维素酶)活性: 采用滤纸法, 根据滤纸纤维素水解产物在碱性条件下还原 3, 5-二硝基水杨酸后, 生成的棕红色氨基化合物在 540 nm 处有最大吸光度测定酶活性, 以每 mg 蚯蚓组织蛋白每小时由底物生成 10^{-3} μ mol 葡萄糖所需的酶量定义为一个活力单位(U).

蛋白质含量采用考马斯亮蓝染色法测定^[20].

SOD、CAT、AKP 和 FP 活性大小均以每 mg 蛋白的酶活表示, 单位为 $U \cdot mg^{-1}$.

1.3.4 蚯蚓其他指标的测定

蚓粪有机质含量(OM)的测定同污泥有机质含量.

相对蚓粪产率: 从滤池中挑选体重约 0.20~0.30 g 的健康成蚓 15 条, 用蒸馏水冲洗表面, 放入干净的培养皿黑暗中培养 24 h, 收集其排泄的蚓粪于 105℃ 下烘 2 h, 测得干重, 然后准确称量蚯蚓总重, 计算而得, 单位为 $mg \cdot g^{-1}$.

以蚯蚓吞食、排泄前后污泥中的无机成分基本不变为前提, 由污泥 OM、蚓粪 OM、相对蚓粪产率三者计算得滤池中蚯蚓摄食量的相对值, 即相对摄食量, 它与相对蚓粪产率相减得相对消化量, 相对消化量与相对摄食量的比值为相对消化率.

$$\text{相对摄食量} = \text{相对蚓粪产率} \times \frac{1 - \text{蚓粪 OM}}{1 - \text{污泥 OM}}$$

1.3.5 统计分析

蚯蚓指标数据均是多个平行样所求平均值, 且各工况均是挑选体重范围大致相同的个体测试.

数据采用 Excel 和 SPSS 12.0 软件处理, 实验结果表示为平均值 \pm 标准偏差. 相关性分析由 SPSS 12.0 软件完成.

2 结果与分析

2.1 蚯蚓生存的环境条件

2.1.1 食料性质

2 种供试食料的化学性质如表 2 所示. 其中生物膜污泥化学性质为 4 个工况下所测平均值. 与腐熟牛粪相比, 生物膜污泥的有机碳稍低, 但其营养成分(TN、TP)却远高于前者, 因此食料的营养成分不会成为蚯蚓生长繁殖的限制因素.

表 2 供试食料的基本化学性质

Table 2 Basic chemical properties of food studied

食料	pH	有机碳	TN	TP	TK	C/N
		/ $g \cdot kg^{-1}$				
生物膜污泥	7.54	370.62	42.39	17.56	4.80	8.74
腐熟牛粪	8.82	409.16	21.01	6.82	5.03	19.47

2.1.2 湿度条件

滤床含水率值可反映滤池内蚯蚓生长环境的湿度变化, 受降水条件和进水流量的综合影响. 蚯蚓靠皮肤呼吸, 环境过于干旱会影响蚯蚓的新陈代谢速率. 但过高的湿度会造成 CO_2 积累, 也不利于蚯蚓生存, 若出现长期渍水现象, 蚯蚓会逃逸, 逃不出去则会窒息死亡. 由于陶粒滤料良好的透水性能, 各工况条件下滤床含水率值相对稳定, 基本保持在 28% 左右, 在蚯蚓适宜环境含水率范围之内(20%~30%).

2.1.3 氧气

陶粒滤料孔隙率高达 52%, 且由于陶粒颗粒的框架作用, 气体在滤床中具有较强的流通性, 保证了装置良好的复氧能力, 避免了厌氧的毒化作用, 自然通风条件下, 所测滤床出水溶解氧含量保持在 $6.00 mg \cdot L^{-1}$ 以上. 滤床内氧气量充足, 不需要额外的供氧设备, 即能保证蚯蚓生存的前提.

2.2 不同水力负荷条件生物滤池出水水质

由表 3 可见, 水力负荷由 $2.4 m^3 \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ 增大至 $6.0 m^3 \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ 时, 蚯蚓生物滤池 COD、 NH_4^+-N 去除率略有下降, 没有显著差异, 工况 4 水力负荷增大到 $6.7 m^3 \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ 时, 滤池出水 COD、 NH_4^+-N 浓度明显增大. 蚯蚓生物滤池 BOD_5 、SS 去除效果较为稳定, 受水力负荷影响较小. TP 去除率在工况 2 达到最高值, 水力负荷继续增大, TP 去除率略有下降. 滤池的 TN 去除效果不明显, 去除率较低, 4 个工况出水 TN 浓度稳定在 $15.48 \sim 29.88 mg \cdot L^{-1}$, 受水力负荷影响不大. 蚯蚓在滤床中穿梭觅食增加了滤池氧含量, 抑止厌氧生物生长, 同时由于滤床高度仅为

0.20 m, 缺少厌氧环境, 影响了TN去除。

表3 各工况蚯蚓生物滤池污染物平均去除率/%

Table 3 Contaminants removal rate of earthworm biofilter/%

工况	COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺ -N	TP	SS
1	47.82	47.00	60.83	37.14	45.42
2	47.36	56.76	39.32	44.99	43.66
3	43.94	51.56	49.60	28.34	41.76
4	39.71	55.14	35.53	29.89	42.18

2.3 水力负荷胁迫对蚯蚓体内抗氧化酶活性的影响

以牛粪蚯蚓为对照, 不同水力负荷条件下滤池蚯蚓的SOD和CAT活性变化如图2、3所示。

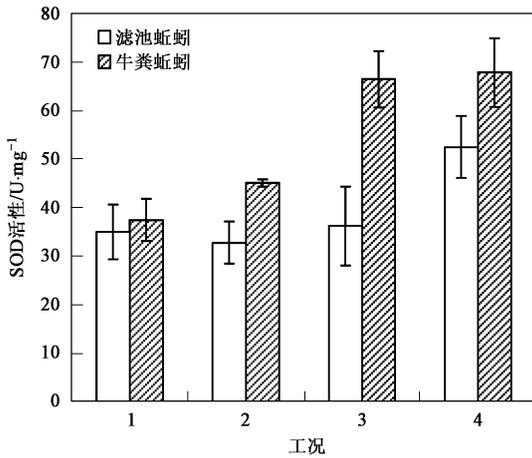


图2 各工况条件下蚯蚓SOD的活性变化

Fig. 2 SOD activity in earthworm under different conditions

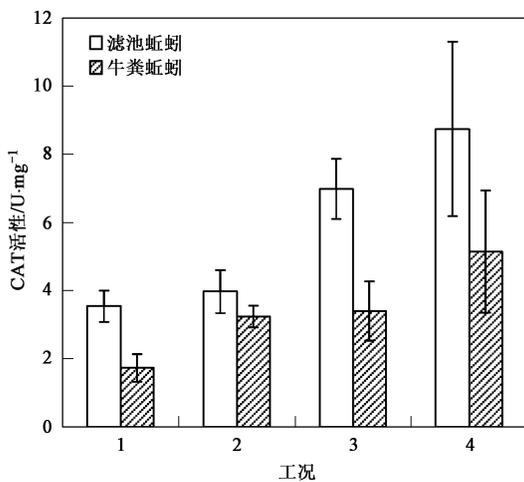


图3 各工况条件下蚯蚓CAT的活性变化

Fig. 3 CAT activity in earthworm under different conditions

滤池蚯蚓和牛粪蚯蚓受相同温度等自然因素影响, 但随着水力负荷的增加, 两者体内抗氧化酶活性

差距越来越显著。在滤池这一非常规环境中, 蚯蚓抗氧化酶活性不仅与温度有关, 更大受到水力冲击干扰的影响。

随着水力负荷的增大, 滤池蚯蚓体内的SOD和CAT活性增加, 蚯蚓抵御外界环境胁迫的能力也越来越强, 说明高水力负荷冲击的环境条件, 蚯蚓必须提高自身抗氧化能力以抵御外界环境胁迫^[21, 22]。在2.4~6.7 m³·(m²·d)⁻¹的水力负荷条件下, SOD和CAT活性均表现为诱导激活现象, 并没有受到抑制, 表明机体内H₂O₂能够及时清除, 没有造成累积^[23, 24]。蚯蚓长期处于较高含水率的非常规环境, 生理机制已适应该环境胁迫, 能够抵抗一定程度的水力冲击, 对生物滤池生存介质具有较强的生理适应能力。

2.4 水力负荷对蚯蚓体内消化酶活性的影响

蚯蚓体内含有丰富的纤维素酶、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、淀粉酶等消化酶类, 在有机物转化和养分的循环中, 对滤池污泥减量化和稳定化效果, 均起着重要的作用。关于蚯蚓消化酶目前研究较多的是纤维素酶和碱性磷酸酶^[25, 26]。

2.4.1 各工况条件下蚯蚓AKP和FP活性

从图4可见, 2个环境中蚯蚓的AKP活性差异显著, 滤池蚯蚓显著高于牛粪蚯蚓, 尤以工况2为突出, 这主要是两者食料的差异^[27, 28]。相比于牛粪食料, 生物膜污泥经过了前期的厌氧-好氧作用过程, 有效态可利用营养物质增加, 微生物量增加, 生物膜污泥中TP含量为17.56 g/kg, 显著高于牛粪中的TP含量(6.82 g/kg), 故滤料中蚯蚓的AKP活性高于牛粪蚯蚓。

参考文献[28]可知AKP与P的循环关系密切。

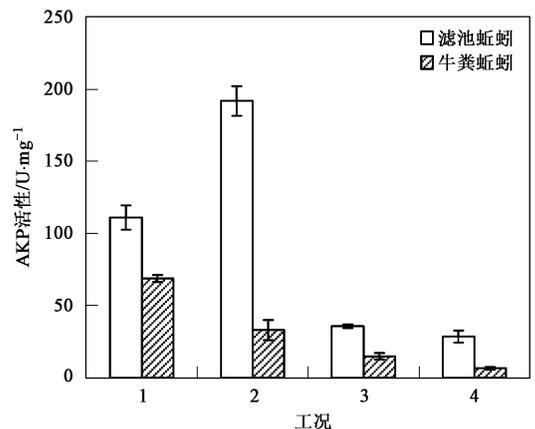


图4 各工况条件下蚯蚓AKP的活性变化

Fig. 4 AKP activity in earthworm under different conditions

4 个工况中, 滤池蚯蚓 AKP 活性呈先增后减的趋势, 工况 2 显著高于其他工况, 说明此条件下蚯蚓对 P 的消化吸收更为彻底, 工况 3 急剧下降, 工况 4 下降至最低值 (28.56 ± 4.27) $U \cdot mg^{-1}$, $6.7 m^3 \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ 的水力负荷对蚯蚓的 AKP 活性造成了较为明显的负作用。4 个工况中, 滤床中 TP 去除率分别为 37.14%、44.99%、28.34%、29.89%, 变化趋势和蚯蚓的 AKP 活性相吻合。

由图 5 可见, 各工况条件下牛粪蚯蚓的 FP 活性均大于滤池蚯蚓。由于牛粪中掺有干草下脚料, 纤维素含量较高, 故参照蚯蚓纤维素酶含量高。且随着温度的升高 FP 活性增强, 但由于其中未及时添加饲料, 纤维素供应量不足, 之后 FP 又呈现下降趋势。

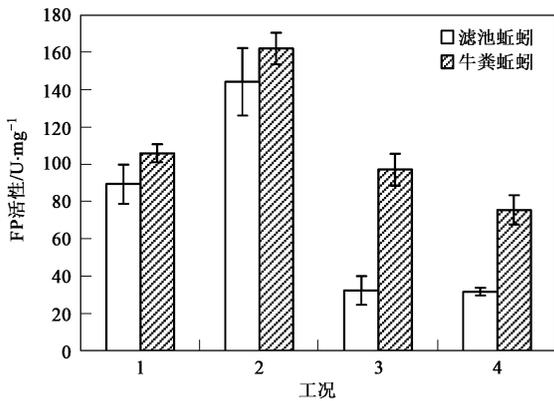


图 5 各工况条件下蚯蚓 FP 的活性变化

Fig. 5 FP activity in earthworm under different conditions

4 个工况中, 滤池蚯蚓 FP 活性变化趋势和其 AKP 活性变化相同。在工况 2 达到最大值 (144.05 ± 18.11) $U \cdot mg^{-1}$ 。前 2 个工况, 滤池蚯蚓和牛粪蚯蚓 FP 活性无显著性差异, 但随着水力负荷的增加, 滤池蚯蚓 FP 活性逐渐显著低于对照组。高水力负荷对蚯蚓体内 FP 活性抑制较显著。

纤维素属难降解有机物, 经测定, 4 个工况生物膜污泥中纤维素平均含量约为 3.7%, 经滤床处理后下降至 3.2%, 而微生物中纤维酶含量极少, 说明蚯蚓对纤维素具有一定的降解作用。

2.4.2 各工况消化酶的作用效果

滤池是靠蚯蚓对滤料截留生物膜污泥的摄食和消化来达到污水处理过程中污泥的减量化和稳定化的效果, 消化量和消化率是蚯蚓消化酶活性综合作用的结果, 直接影响着滤池的运行效率。比较各工况条件下滤池蚯蚓的消化量和消化率如表 4 所示。

各工况滤池蚯蚓食料 OM 以该工况进水平均 OM 为准。4 个工况波动不大, 因此随着水力负荷的增加, 流量增大, 对滤池蚯蚓供养的食料绝对量增大, 但食料性质无显著差异。

各工况滤池污泥减量率及污泥有机质分解率均按照该工况蚯蚓滤池处理前后污泥量或有机质量衡算确定, 可更直观量化地反映整个系统污泥减量和稳定化效果。滤池污泥减量率 = (滤池总进泥量 - (排水区沉积污泥量 + 最终出水携带污泥量)) / 滤池总进泥量。

表 4 各工况条件下滤池蚯蚓的摄食和排泄

Table 4 Food-taken and excretion of earthworms in different conditions

工况	食料 OM / %	蚓粪 OM / %	蚓粪产率 / $mg \cdot g^{-1}$	摄食量 / $mg \cdot g^{-1}$	消化量(以 OM 计) / $mg \cdot g^{-1}$	消化率 / %	污泥减量率 / %	污泥有机质分解率 / %
1	60.70	37.67 ± 1.11	6.44 ± 0.88	10.21 ± 1.27	3.77 ± 0.40	36.92	45.8	60.8
2	63.30	37.24 ± 2.21	11.97 ± 3.65	20.45 ± 5.52	8.48 ± 1.87	41.47	48.2	65.5
3	58.90	36.50 ± 0.70	8.40 ± 0.89	12.97 ± 1.29	4.58 ± 0.42	35.31	41.2	54.6
4	58.20	37.57 ± 0.76	5.54 ± 0.84	8.27 ± 1.23	2.73 ± 0.39	33.01	40.5	52.9

总进泥量由各工况日平均进水 SS 浓度和进水流量确定。排水区沉积污泥量可由该工况结束排水区泥水混合液的体积及其 SS 浓度确定。最终出水携带污泥量, 即排水区溢流上清液携带污泥量, 由该工况排水区最终出水的日平均 SS 浓度和出水流量确定。

从表 4 可见, 滤池蚯蚓的摄食和消化水平受水力冲击干扰的影响显著。

工况 2 较工况 1 流量增大 1 倍, 供应的食物绝对量增加, 同时温度小幅度提升使得蚯蚓活性增强, 蚯蚓的摄食量和消化量(以 OM 计)均达到最大值, 分别为 (20.45 ± 5.52) $mg \cdot g^{-1}$ 和 (8.48 ± 1.87)

$mg \cdot g^{-1}$ 。在各工况蚯蚓食料性质无显著差异的情况下, 工况 2 蚯蚓消化率(41.47%)显著高于其他工况。蚯蚓食料 OM 和相对蚓粪 OM 的差值也可反映蚯蚓的消化能力, 工况 2 蚯蚓的食料和蚓粪 OM 下降的百分点(约 26.09)高于其余 3 个工况(20.63~23.03 个百分点)。说明 4 个工况中, 蚯蚓在工况 2 具有最好的消化能力, 能有效利用污泥中的有机质成分, 用以自身生物量的合成以及呼吸、生殖等一系列的生命活动, 通过其肠道消化后排泄物性质稳定。蚯蚓良好的消化能力保证了滤池污水处理过程中, 良好的污泥稳定化和减量化效果, 污泥减量率、污泥有

机质分解率均在工况 2 达到最大值 (48.2%、65.5%)。

随着水力负荷的增加, 蚯蚓消化率以及滤池 SS、VSS 减量率呈下降趋势. 当水力负荷增至 $6.7 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 进水流量过大, 对蚯蚓的环境胁迫超过一定的限度, 不利于蚯蚓生态功效的发挥. 因此工况 4, 给蚯蚓供应的食物绝对量虽然显著增加, 但蚯蚓摄食量、消化量和消化率以及滤池 SS、VSS 减量率都下降至最低点.

以 AKP、FP 活性为参照, 不同水力负荷影响下, 蚯蚓消化能力、污泥减量率以及污泥有机质分解率和消化酶活性具有很好的相关性. AKP 活性与蚯蚓消化率 ($r = 0.967$) 以及污泥减量率 ($r = 0.984$) 之间呈显著相关性 ($p < 0.05$), 与污泥有机质分解率存在极显著相关 ($p < 0.01$, $r = 0.991$). FP 活性与蚯蚓消化率 ($r = 0.957$)、污泥减量率 ($r = 0.985$) 以及污泥有机质分解率 ($r = 0.989$) 之间均呈显著相关性 ($p < 0.05$).

蚯蚓消化酶活性变化可以敏感地反映其受水力负荷胁迫的程度, 酶活性是否受抑制及抑制程度的大小均直接影响着蚯蚓消化作用的强弱以及滤池污泥减量化和稳定化效果. 所以测定蚯蚓的消化酶活性, 对确定滤池的水力负荷, 优化滤池的运行工况, 具有较好的指导意义.

3 结论

(1) 水力负荷 $2.4 \sim 6.7 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 范围内, 随着水力负荷的提升, 蚯蚓体内的 SOD 和 CAT 活性增大, 蚯蚓抵御外界环境胁迫的能力也越来越强, 能够抵抗一定程度的水力冲击.

(2) 不同水力负荷影响下, 蚯蚓体内消化酶活性和蚯蚓的消化能力、滤池污泥减量化和稳定化效果具有很好的相关性.

(3) 水力负荷为 $4.8 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 滤池蚯蚓具有较高的 AKP、FP 活性, 蚯蚓摄食、消化、排泄等生态功效发挥良好, 滤池 SS、VSS 减量率到达最高值, 分别为 48.2%、65.5%. 当水力负荷达到或超过 $6.0 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 蚯蚓消化酶活性呈现明显下降趋势, 对污泥的代谢水平受到影响, 滤池污泥减量率、污泥有机质分解率均有一定程度下降, 不利于蚯蚓生态功效的发挥.

(4) 为维持蚯蚓较好的生存环境, 保证蚯蚓滤池正常的生态功效的发挥, 推荐蚯蚓生物滤池运行水力负荷为 $4.8 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$

参考文献:

- [1] 韩润平, 陆雍森, 杨健, 等. 复合床生态滤池处理城市污水中试研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 450-454.
- [2] 陈, 肖亿群, 邱江平. 蚯蚓生物滤池处理城市污水初步试验[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2003, 21(4): 336-339.
- [3] 张宝贵, 李贵桐, 申天寿. 威廉环毛蚯蚓对土壤微生物量及活性的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(1): 168-172.
- [4] 吴敏, 马小杰, 杨健, 等. 蚯蚓生物反应器污泥减量与稳定化效果试验研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(6): 401-405.
- [5] 刘文丽, 徐冬梅, 刘惠君, 等. 异丙甲草胺对蚯蚓体重及酶活性的影响[J]. 环境科学学报, 2007, 27(12): 2025-2031.
- [6] Pereira G J G, Molina S M G, Lea P J. Activity of antioxidant enzymes in response to cadmium in *Crotalaria juncea* [J]. Plant Soil, 2002, 239: 123-132.
- [7] 孙福红, 周启星, 张倩如. 石油烃、 Cu^{2+} 对沙蚕的毒性效应及其抗氧化酶系统的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1415-1419.
- [8] 王献溥, 刘玉凯. 生物多样性的理论与实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [9] Xiao H, Zhou Q X, Liang J D. Single and joint effects of acetochlor and urea on earthworm *Eisenia fetida* populations in phaeozem [J]. Environ Geochem Health, 2004, 26(2): 277-283.
- [10] Edwards C A, Bohlen P J. Biology and ecology of earthworms [M]. London: Chapman and Hall, 1996.
- [11] 张薇, 宋玉芳, 孙铁珩, 等. 菲和芘对蚯蚓 (*Eisenia fetida*) 细胞色素 P450 和抗氧化酶系的影响[J]. 环境化学, 2007, 26(2): 202-205.
- [12] 李银生, 曾振灵, 陈杖榴, 等. 洛克沙肿污染胁迫下蚯蚓体内酶的富集和释放[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(2): 213-217.
- [13] 梁海燕, 李银生, 孙静, 等. 铝离子污染胁迫对蚯蚓重要抗氧化酶活性的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2007, 25(6): 551-555.
- [14] 吴国英, 贾秀英. 猪粪重金属对蚯蚓体重及纤维素酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 219-221.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水分析方法[M]. (第四版). 北京: 环境科学出版社, 2002.
- [16] 南京农业大学. 土壤化学分析[M]. (第二版). 北京: 农业出版社, 1992.
- [17] 吕淑霞. 基础生物化学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [18] 朱小山, 朱琳, 郎宇鹏, 等. 人工纳米材料富勒烯 (C_{60}) 低剂量长期暴露对鲫鱼的氧化伤害[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 855-861.
- [19] Tabatabai M A. Soil enzymes [A]. In: Page A L, Miller R H, Keeney D R, (Eds). Methods of soil analysis [C]. Part 2 Am Soc Agron, Madison, USA, 1982. 903-947.
- [20] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein using the principle of protein-dye binding [J]. Anal Biochem, 1976, 72: 248-254.
- [21] 张福锁. 环境胁迫与植物营养[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993. 79.
- [22] 朱雪梅, 邵继荣, 杨文钰, 等. 温度对不同穗重型水稻叶片保护酶

- 活性及同工酶表达的影响[J]. 核农学报, 2005, 19(4): 260-264.
- [23] 陈荣, 郑微云, 余群, 等. 石油污染对僧帽牡蛎(*Ostrea cuallata*) 抗氧化酶的影响[J]. 环境科学学报, 2002, 22(3): 385-388.
- [24] 张景飞, 王晓蓉. 2,4-二氯苯酚低浓度长期暴露对鲫鱼肝脏抗氧化酶系统的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(5): 136-140.
- [25] Lattaud C, Zhang B G, Locati S, *et al.* Activities of the digestive enzymes in the gut and in tissue culture of a tropical geophagous earthworm, *Polyphega dangalu* (Megascolecidae) [J]. Soil Biol Biochem, 1997, 29: 335-339.
- [26] 史雅静, 颜世发, 史雅娟, 等. 溴氰菊酯对蚯蚓体重及体内纤维蛋白酶乙酰胆碱酶活性的影响[J]. 东北师大学报自然科学版, 2004, 36(3): 91-94.
- [27] 张宝贵, 李贵桐, 孙钊, 等. 两种生态类型蚯蚓几种消化酶活性比较研究[J]. 生态学报, 2001, 21(5): 978-981.
- [28] Zhang B G, Li G T, Shen T S, *et al.* Change in microbial biomass C, N, and P and enzyme activities in soil incubated with the earthworms *Metaphire guillelmi* or *Eisenia fetida* [J]. Soil Biol Biochem, 2000, 32(14): 2055-2062.

欢迎订阅 2009 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年, 由中国科学院主管, 中国科学院生态环境研究中心主办, 是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来, 始终坚持“防治污染, 改善生态, 促进发展, 造福人民”的宗旨, 报道我国环境科学领域内具有创新性高水平, 有重要意义的基础研究和应用研究成果, 以及反映控制污染, 清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发刊, 并在国内外科技界有较大影响, 被国内外一些重要检索系统收录, 如美国医学索引 MEDLINE; 美国工程索引 EI; 美国化学文摘 CA; 俄罗斯文摘杂志 AJ; 美国生物学文摘预评 BP; 美国医学索引 IM; 日本科学技术情报中心数据库 JICST; 英国动物学记录 ZR; 剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences; 剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts; 剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等; 国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD); 中文科技期刊数据库(维普); 中国期刊全文数据库(CNKI); 数字化期刊全文数据库(万方); 中国科学引文数据库(CSCD); 中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅, 如有漏订的读者可直接与编辑部联系, 办理补订手续。

《环境科学》2009 年为 16 开本, 70 元/册, 全年 12 期。

国内统一刊号: CN11-1895/X 国际标准刊号: ISSN 0250-3301

国外发行代号: M 0205 国内邮发代号: 2-821

编辑部地址: 北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编: 100085

电话: 010-62941102; 传真: 010-62849343; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjkx.ac.cn