

蚯蚓生物滤池启动驯化阶段蚯蚓生理生态适应性研究

杨健, 邓德汉, 陈巧燕, 赵丽敏, 易当皓

(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: 研究了蚯蚓生物滤池在启动驯化阶段蚯蚓的生理生态状态变化, 并分析了相关影响因素. 结果表明, 由于受到自然环境和滤池环境的胁迫, 蚯蚓投加后数量和生物量出现逐渐下降的趋势. 一旦条件适宜, 幼蚓的孵化可以补充滤池内蚯蚓的数量和生物量. 随着温度的升高, 周边的蚯蚓逐渐向布水区移动, 投加 58d 后蚯蚓分布较为均匀. 蚯蚓密度和含水率之间存在着极显著负相关. 温度、日平均降水量和降水强度积分 3 个自然影响因子对蚯蚓各生态指标的影响均不显著. 温度低于 15℃ 时, 蚯蚓呼吸率变化较为敏感, 出现大幅度下降, 不利于蚯蚓代谢处理污水污泥. 在一定范围内, 采取措施提高滤池内蚯蚓的密度并使蚯蚓分布均匀将提高污泥的处理效率.

关键词: 蚯蚓生物滤池; 驯化阶段; 生态适应性; 生理适应性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)08-2358-08

Ecological and Physiological Adaptabilities of Earthworm in Biofilter Under Domestication Stage

YANG Jian, DENG De-han, CHEN Qiao-yan, ZHAO Li-min, YI Dang-hao

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

Abstract: Ecological and physiological adaptabilities of earthworm in biofilter under domestication stage is presented, as well as related factors. The results show that, due to the coercion of natural and filter environment, the number and biomass of earthworms present a gradual downward trend after added. But once the conditions become appropriate, hatching of larvae could add the number and biomass of earthworm in the filter. With the increase of temperature, circumjacent earthworms gradually move to the water distribution area, 58 days later earthworms distribution become more uniform. Earthworm density and moisture content exist the significant negative correlation. Temperature, precipitation and rainfall don't affect the ecological indicators of earthworms significantly. When temperature is below 15℃, the earthworms' respiratory rate become more sensitive and decline significantly which is not conducive for earthworms treatment of sewage sludge. In a certain range, it's effective for improving the efficiency of sludge treatment to increase the density of earthworms and distribute earthworms evenly.

Key words: earthworm biofilter; domestication stage; ecological adaptation; physiological adaptation

蚯蚓生物滤池是在传统污水生物反应器中引入蚯蚓等物种, 延长和扩展了反应器中原有食物链, 通过微生物和蚯蚓的协同共生作用, 可同步实现污泥的减量化与稳定化^[1~3]. 该工艺利用蚯蚓在滤床中分解和利用污水和污泥中的有机物和营养物质, 疏通滤床堵塞物及促进含氮物质的硝化与反硝化作用, 集物理过滤、吸附、好氧分解和污泥处理等功能于一身^[4].

国内外针对蚯蚓在土壤自然环境中生理生态状态的研究比较成熟^[5~7], 在受到环境污染物抑制作用下蚯蚓的生态毒理学试验, 如呼吸率、酶类、蛋白质含量变化也有较多报道^[8~12]. 20 世纪 80 年代以来, 人们将蚯蚓引入到有机废弃物处理技术中, 用人工控制的方法实现蚯蚓堆肥处理城市垃圾、禽畜粪便、农作物秸秆、有机污泥等废弃物, 并主要考察了堆肥对象成分的变化及对蚯蚓生长繁殖的影响^[13, 14]. 单独针对蚯蚓在特殊环境中如生物滤池中滤料与生物膜污泥混合物中的环境适应性研究

较少.

蚯蚓在饲养场以腐熟牛粪为食料, 并在上部覆盖土壤保温, 该蚯蚓主要受到温度、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, 其生存环境也发生很大改变, 连续不断进水使滤池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”的蚯蚓生存受到胁迫. 本实验通过研究投加初期滤池中蚯蚓的生理生态指标变化来反映蚯蚓在逆境环境中的驯化适应过程, 从蚯蚓自身的角度来评价其在该工艺中发挥污水污泥同步处理功能的可行性, 以期为使蚯蚓生态滤池正常运行的条件控制提供参考和依据.

收稿日期: 2008-08-28; 修订日期: 2008-10-10

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

1 材料与方法

1.1 试验装置

蚯蚓生物滤池(图 1)中试装置设在上海某污水厂内,采用旋转布水器布水,滤池直径 $\phi=3.7\text{ m}$,高 1.83 m ,滤料层高 0.2 m .所选滤料都具有硬度大、耐风化、耐水蚀等特点.滤料层表面铺一层塑料纤维填料,约 0.1 m ,起到二次布水的作用,其孔隙率达 96% ,遮光率为 $83.71\%\sim 92.34\%$,对蚯蚓的生存、生长有利.

滤池投加的蚯蚓为赤子爱胜蚓,正蚓科,爱胜蚓属,属于粪蚯蚓类,个体较小,体长 $40\sim 150\text{ mm}$,体宽 $3\sim 5\text{ mm}$,体节 $80\sim 110$ 节.试验初期,滤池共投加蚯蚓约 20 万条,蚯蚓平均质量 0.1320 g .

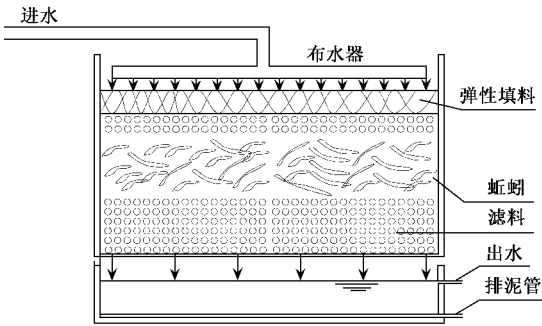


图 1 蚯蚓生物滤池中试装置

Fig.1 Schematic diagram of earthworm biofilter apparatus

1.2 试验方法和条件

1.2.1 试验方法

为研究不同区块蚯蚓的动态变化,将整个滤池按照直径方向分为 3 个区块.距池壁 18 cm 以内的圆环为一区块,从圆心出发,半径 50 cm 的为中央区块,剩余的为另一区块,从外到内依次表示为 A 、 B 、 C 区.以牛粪中饲养的牛粪蚯蚓为参照,测定各区蚯蚓的呼吸率和蚓粪性质、产率,试验各个指标均重复 3 次.运行 10 d 后开始发现离池壁 30 cm 处蚯蚓分布较多,且中环处蚯蚓的活动范围下伸到 10 cm 深处,故将外环样品延伸到离池壁 30 cm 处,分别用 A' 、 B' 、 C' 表示此时三环的样品.

1.2.2 水质指标

蚯蚓生物滤池进、出水 COD 、 NH_4^+-N 、 SS 、 TN 和 TP 的测定参照文献[15].

1.2.3 蚯蚓指标

(1)蚯蚓数量和生物量 蚯蚓沿滤池深度方向上,非均匀分布,主要集中在表层 $0\sim 10\text{ cm}$,因此,蚯

蚓数量和生物量均以单位滤池面积为单位分析.随机采集滤池内 200 mL 样品,用手捡法进行计数(按照蚯蚓、蚓茧分别计数),重复 5 次,并对蚯蚓逐条称重(取样只在表层 10 cm 范围内进行,表层 10 cm 以下区域蚯蚓数视为 0).

(2)蚯蚓生长环境含水率 含水率值为质量分数,以布水器关闭瞬间,泥与陶粒混合物在 105°C 烘干 2 h 的失重比例为准.

(3)蚓粪有机质含量(OM)的测定 同污泥有机质含量[16].

(4)相对蚓粪产率 从滤池中挑选质量约 $0.20\sim 0.30\text{ g}$ 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°C 下烘 2 h ,测得干重,然后准确称量蚯蚓总质量,计算而得,单位 mg/g .

(5)相对消化率 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.

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

(6)呼吸率 参照土壤微生物呼吸速率碱液吸收法[17,18],单位: $10^{-3}\text{ mmol}/(\text{g}\cdot\text{h})$.

1.2.4 进水条件

进水水量 $Q=2.0\text{ m}^3/\text{h}$,水力负荷 $q=4.8\text{ m}^3/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$, pH 为 $6.94\sim 7.50$, SS 为 $28.75\sim 60.25\text{ mg/L}$, COD 为 $92.52\sim 143.74\text{ mg/L}$, BOD_5 为 $26\sim 72\text{ mg/L}$, NH_4^+-N 为 $12.62\sim 24.64\text{ mg/L}$.

2 结果与讨论

2.1 温度和降水

本试验阶段历时 58 d .期间温度和降水条件见图2、图3.试验期间当地最高温度 $7.0\sim 24.0^\circ\text{C}$,最低温度 $1.0\sim 18.0^\circ\text{C}$,室外温度接近当日最高温度.由于滤池处于日夜不间断进水状态,大比热的水对温度具有一定的调节作用,使池内温度($9.0\sim 20.0^\circ\text{C}$)不至于过高或过低,有利于保证滤池内蚯蚓的生存和繁殖等生理过程.

根据上海当地降水资料,试验期间日平均降水量为 $0\sim 8.2\text{ mm/d}$,对不同日降雨强度赋予分值,按照出现次数累积计分,蚯蚓在第 13 、 41 和 58 d 时受到较大程度的降雨影响(如图3).

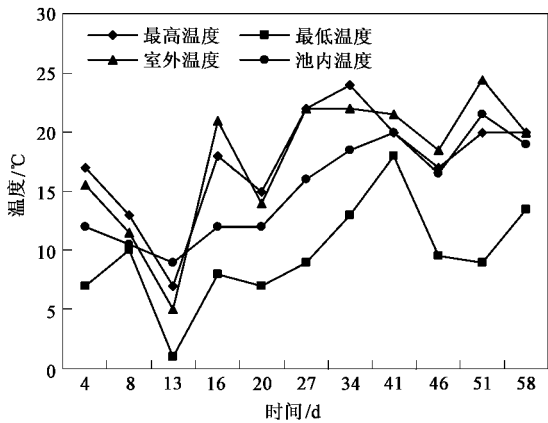


图2 驯化阶段的温度条件

Fig.2 Temperature in domestication stage

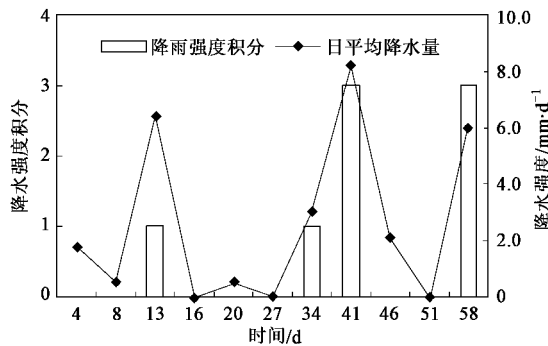


图3 驯化阶段的降水条件

Fig.3 Precipitation in domestication stage

2.2 含水率

3个区块中B(B')为主要布水区,故含水率最高,其范围为11.56%~22.27%(图4),且随着池内持泥量的增大呈逐渐上升趋势.由于蚯蚓投加初期布水器中部发生漏水现象,水头损失较大,未能布及周边A(A')区块,经整修后情况有所改善.因此,A(A')含水率逐渐增大,而滤池中央C(C')区块含水率逐渐减小.

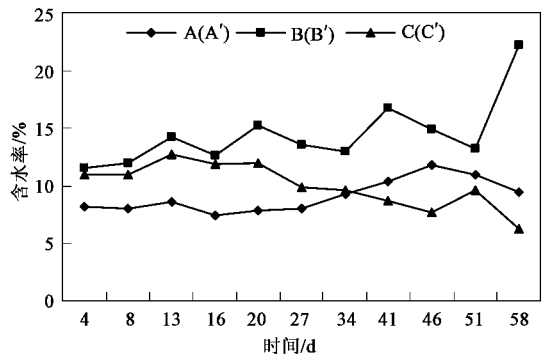


图4 驯化阶段滤池各区的含水率

Fig.4 Moisture content of different districts in domestication stage

2.3 驯化阶段蚯蚓的生态适应性变化

2.3.1 各区蚯蚓数量变化

驯化阶段滤池内各区蚯蚓数量及有环带个体比例变化见图5、图6.随着温度的升高,蚯蚓体活动能力增强,当微生态环境不适合自身生长时(如受光照、含水率等因素影响),它会主动在3个区块之间自由移动,以寻找适于生存的空间.从图6可见,投加初期3个区块的蚯蚓分布差异显著,密度大小顺序为A(A')>C(C')>B(B'),等气温达到一定水平后(第41d)3个区块蚯蚓分布逐渐趋于平衡和稳定,但密度仍以A(A')最大,C(C')次之,B(B')最小.

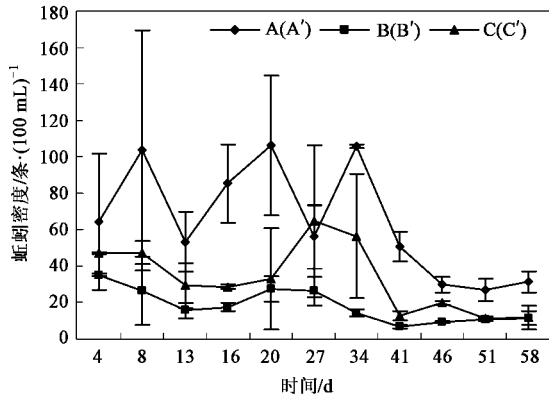


图5 驯化阶段各区蚯蚓密度变化

Fig.5 Earthworm density of different districts in domestication stage

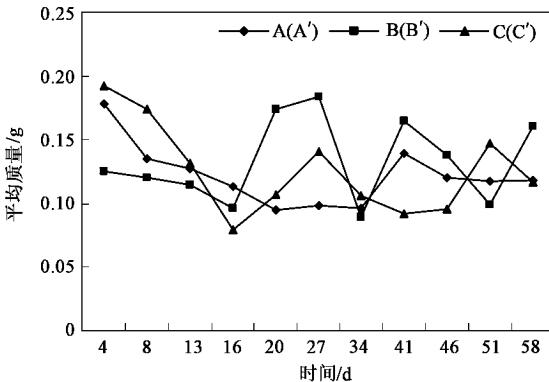


图6 驯化阶段滤池中各区蚯蚓平均质量变化

Fig.6 Average weight change of earthworms of different districts in domestication stage

2.3.2 各区蚯蚓质量变化

蚯蚓的平均质量一定程度上反映蚯蚓的“健康”程度和种群结构.蚯蚓平均质量的变化受多个因素的影响,其中包括以下3种情况:①当蚯蚓数量变化不大时,平均质量的改变主要由单个个体蚓重引起的.如果同化作用大于异化作用,则蚯蚓合成自身的

物质增加, 蚓重增加; 同化作用小于异化作用时, 蚓重减小, 平均质量也减小; ②蚯蚓发生逃逸或者死亡时, 不同质量范围的蚯蚓个体数量的减少会改变种群的平均质量, 大个体蚯蚓减少使平均质量下降, 小个体蚯蚓减少使平均质量上升; ③当蚓茧大量孵化时, 幼蚓数量增加, 蚯蚓平均质量下降^[19].

各区蚯蚓的平均质量见图 6. 滤池内的蚯蚓种群受到温度、降水、食料结构以及各区微环境变化的影响, 同时蚯蚓又在各区之间爬行移动, 从而导致各区蚯蚓平均质量的变化较为复杂. 在蚯蚓投加后的 58 d 中, A(A′)、B(B′)、C(C′) 3 区块的平均质量范围分别为 0.094 7 ~ 0.178 7 g、0.096 3 ~ 0.184 3 g、0.079 1 ~ 0.192 7 g, 相比较而言, C(C′) 区的环境变化幅度最大, 故蚯蚓的平均质量变化也最大. 投加后的 16 d 内蚯蚓对滤池内的生长环境不适应, 蚯蚓进

食少、代谢消耗大, 故三区块的平均质量均有一定程度的下降.

蚯蚓的质量分布见图 7, 驯化阶段各区的蚯蚓主要以 0.1 g 以下的小个体蚯蚓为主, 所占比例范围为 34.21% ~ 74.0%, > 0.3 g 的个体较少, 所占比例范围为 0.00% ~ 28.95%. 如以投加初期(第 4 d)作为牛粪蚯蚓质量范围做参照, 随着时间的推移, 0.1 ~ 0.2 g 范围内的蚯蚓数量呈现逐渐增大的趋势, 而 > 0.3 g 蚯蚓所占比例逐渐减少. 蚯蚓的质量范围在各区之间也存在着一定的差别, 相对于 A(A′)、C(C′) 而言, B(B′) 区蚯蚓在第 20、27、41、46、58 d 时 < 0.1 g 的蚯蚓个体所占比例相对较小, 而 > 0.3 g 占的比例相对较高, 说明在大面积的布水区大个体的蚯蚓更能承受降温(第 20 d)和降雨(第 41、58 d)的冲击影响.

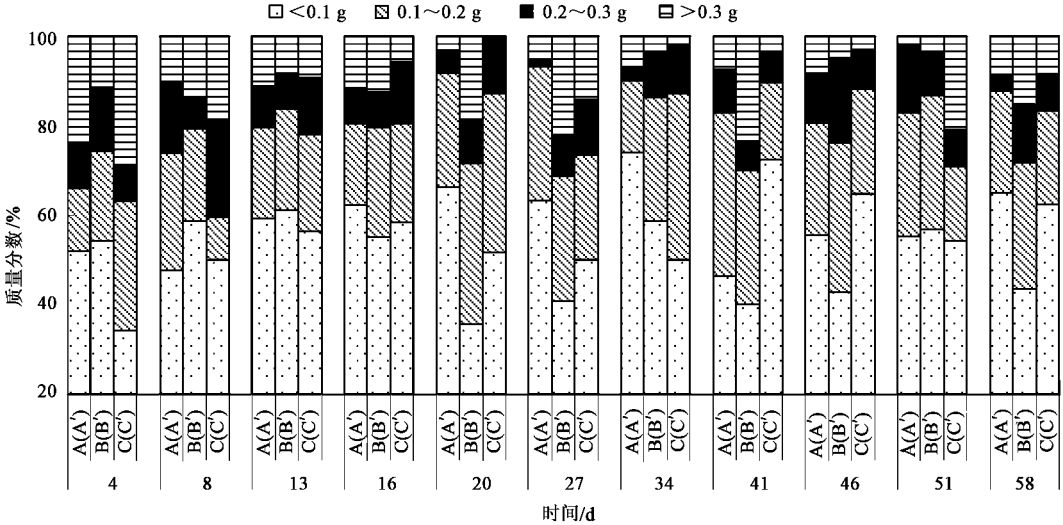


图 7 驯化阶段各区蚯蚓质量范围比例分布

Fig.7 Weight distribution of earthworms of different districts in domestication stage

2.3.3 含水率对各区蚯蚓的影响

A(A′)、B(B′)、C(C′) 三区块之间蚯蚓密度、有环带个体比例、平均质量以及各范围质量的比例分布都存在着一定的差异. 根据观察结果显示, 在自然

条件相同的前提下, 含水率是反应各区蚯蚓生长微环境的主要因素之一. 现采用两变量相关分析的方法, 比较含水率与蚯蚓密度、有环带个体比例、平均质量以及各质量范围比例之间的相关性(见表 1).

表 1 各区含水率与蚯蚓相关指标之间的相关性分析¹⁾

Table 1 Correlation analysis between moisture content and some earthworm indexes

参数	变量	蚯蚓密度	有环带个体比例	平均质量	质量分布范围/g			
					< 0.1	0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 0.3	> 0.3
Spearman 相关系数 R_s	含水率	-0.585**	0.059	0.278	-0.539**	0.418*	0.299	0.186
概率 p	含水率	0.000	0.743	0.117	0.001	0.015	0.091	0.299
自由度 N	含水率	33	33	33	33	33	33	33

1) * 表示显著相关(0.01 < p ≤ 0.05), ** 表示极显著相关(p ≤ 0.01)

由表 1 可见,蚯蚓密度和含水率之间存在着极显著负相关,在蚯蚓生态滤池各区块的微环境中,含水率越大,蚯蚓密度越小.滤池中生物膜污泥和石英砂的混合物含水率范围为 6.30% ~ 22.27%,单从含水率角度讲,可以满足蚯蚓的生存条件.但结合滤池内的实际环境条件,蚯蚓的分布是温度、降水、水力负荷、持泥率以及其他干扰因素综合作用的结果.B(B')区为大面积的布水区,而 A(A')区为非布水区,C(C')区在驯化阶段的环境条件变化较大.从上面的分析可得,在温度升高、无大强度降水影响的条件下,蚯蚓可以在从非布水区向布水区移动,使布水区维持一定的蚯蚓密度.而温度降低、滤池堵塞时,蚯蚓则逃逸到干扰较小的区块.因此,根据上述分析,蚯蚓生态滤池中含水率和蚯蚓密度之间的相关性可以在一定程度上指导滤池的运行,通过人工介入适当控制和减小 B(B')区含水率,可以改善蚯蚓的均匀分布.

另外从表 1 中可得含水率与质量范围 < 0.1 g 的个体比例呈极显著负相关,与 0.1 ~ 0.2 g 蚯蚓个体比例呈显著正相关.说明在高含水率区块质量 < 0.1 g 的个体较难存活,而 0.1 ~ 0.2 g 的蚯蚓根据自身需要可以在区块间自由移动,在高含水率区块石英砂持泥率较高,蚯蚓可以获得更多的食料满足自身生命活动的需要.

2.3.4 滤池内蚯蚓的生态变化

滤池内蚯蚓总数、总生物量以及相关指标值如图 8 ~ 10 所示,并对各指标在投加后的 58 d 时间前后进行显著性分析.蚯蚓从初始投加以来变化较大,前后显著性差异明显,故采用其平均值进行作图分析.

投加后第 4、8 d 蚯蚓总数分别为 $(2.22 \pm 0.10) \times 10^5$ 条和 $(2.26 \pm 0.27) \times 10^5$ 条,两者不存在显著性差异,但蚯蚓的平均质量和总生物量却均有所下降,说明投加初期蚯蚓数量变化不大,但为了适应环境胁迫,代谢消耗大,质量有所下降.第 13 d 温度下降到 9.0℃,蚯蚓死亡和逃逸率高,蚯蚓总数下降到 1.26×10^5 条,蚯蚓平均质量也有所下降,故总生物量将近减少一半.大幅度降温对蚯蚓数量和质量都产生较大影响.

之后随着气温的回转,原投加蚯蚓种群中的蚓蚬开始孵化,滤池中的蚯蚓数量又开始回转,并在第 20 d 达到另一个高峰值 $(2.27 \pm 0.13) \times 10^5$ 条,蚯蚓孵化使平均质量在第 16 d 下降到 0.103 8 g ± 0.000 3 g,而后又开始上升.第 20 d 又出现小幅度降

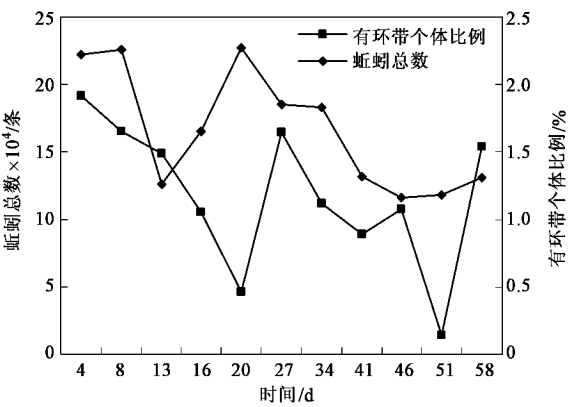


图 8 驯化阶段滤池中蚯蚓总数和有环带个体比例变化
Fig.8 Number and proportion of individual with clitellum of earthworms in domestication stage

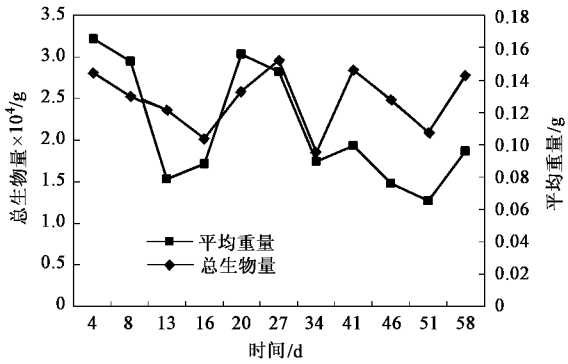


图 9 驯化阶段滤池中蚯蚓总生物量和平均质量变化
Fig.9 Total biomass and average weight of earthworms in domestication stage

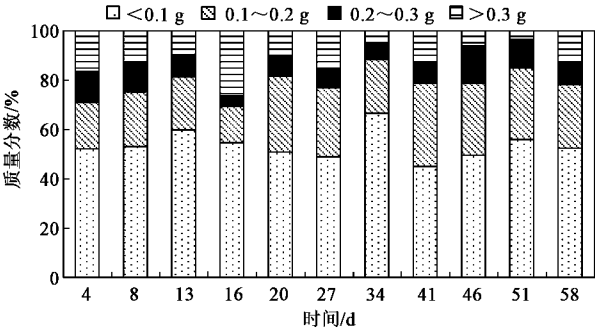


图 10 驯化阶段滤池中蚯蚓各质量范围分布
Fig.10 Weight distribution of earthworms in domestication stage

温,蚯蚓总数再次下降到 $(1.85 \pm 0.11) \times 10^5$ 条,而此时的蚯蚓平均质量却可达到 0.152 4 g ± 0.002 0 g,说明受到冲击的多为刚孵化不久的小个体幼蚓.

第 41 d 由于连续降水影响蚯蚓数量有所下降,但第 58 d 的降雨对蚯蚓的影响却相对较小.滤池内

的蚯蚓受温度、降水和认为因素的协同作用, 温度升高, 蚯蚓对降水冲击的抵抗能力上升. 41 d 后蚯蚓总数和总生物量逐渐趋于稳定, 滤池内没有新产生的蚓茧, 故没能孵化小蚯蚓以增加种群数量.

2.3.5 自然条件对蚯蚓的生态影响

驯化阶段蚯蚓生态滤池的进水量保持不变, 但进水 SS 的变化使得滤池内石英砂持泥量不同, 导致蚯蚓生长环境不同; 另外, 布水器维修等人为因素亦

会引起滤池微环境的变化. 结论表明含水率对蚯蚓密度和质量范围 < 0.1 g 和 0.1 ~ 0.2 g 的蚯蚓个体比例影响较大. 为研究自然因素对蚯蚓的生态影响, 现采用偏相关分析的方法, 在温度、平均日降水量、降水强度积分 3 个变量中, 分别以温度、平均日降水量、降水强度积分为影响因子, 固定其他变量中的 2 个, 分析各影响因子与蚯蚓相关指标之间的相关性 (见表 2).

表 2 自然因子与蚯蚓相关指标之间的偏相关性分析

变量		参数	蚯蚓总数	有环带个体比例	平均质量	总生物量	质量分布范围/g			
							< 0.1	0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 0.3	> 0.3
温度		Spearman 相关系数 R_s	-0.620 4	-0.512 9	-0.227 6	-0.550 4	-0.027 4	0.499 9	0.249 6	-0.631 3
		概率 p	0.075	0.158	0.556	0.125	0.944	0.171	0.517	0.068
		自由度 N	7	7	7	7	7	7	7	7
日平均降水量		Spearman 相关系数 R_s	-0.554 9	-0.065 1	-0.101 9	-0.449 1	0.070 5	0.135 4	0.323 7	-0.553 0
		概率 p	0.121	0.868	0.794	0.225	0.857	0.728	0.395	0.123
		自由度 N	7	7	7	7	7	7	7	7
降水强度积分		Spearman 相关系数 R_s	0.426 2	0.207 4	0.230 1	0.380 4	-0.115 1	-0.094 6	-0.418 0	0.553 6
		概率 p	0.253	0.592	0.551	0.313	0.768	0.809	0.263	0.122
		自由度 N	7	7	7	7	7	7	7	7

从表 2 可见, 温度、日平均降水量和降水强度积分 3 个自然影响因子对蚯蚓各生态指标的影响均不显著. 以含水率作为控制因素的综合代表值, 说明相对于人为控制因素, 自然因素的作用相对较弱. 而且温度与蚯蚓总数、有环带个体比例、平均质量及总生物量之间的相关系数为负值. 而在一般自然环境条件下, 一定范围内温度升高有利于蚯蚓的生长繁殖. 这更进一步说明本试验驯化阶段蚯蚓的数量、平均质量、总生物量等受滤池内人为环境因素的影响大大超过了自然因素的影响, 池内蚯蚓受到该条件的胁迫, 生长规律和种群结构遭到一定程度的破坏.

2.4 驯化阶段蚯蚓的生理适应性

2.4.1 摄食和排泄

蚯蚓摄食后对食料中的营养物质(主要为有机

质)进行一系列的生化反应和物质能量代谢, 经过消化利用后最终有 3 个去向: ①合成蚯蚓自身生长的机体增重物质; ②用于呼吸、产茧、爬行等一系列生命活动; ③随体液和粪便等排出体外^[20]. 蚯蚓投加 4d 后, 对以牛粪为食料的蚯蚓以及 A(A')、B(B')、C(C')三区块蚯蚓的食料 OM、蚓粪 OM、蚓粪产率进行测定, 并假定食料中的非有机质成分不被蚯蚓消化吸收, 取食料 OM、蚓粪 OM 和蚓粪产率的平均值, 计算蚯蚓的摄食量、消化量和消化率, 其中摄食量为单位质量蚯蚓摄食总量, 消化量为被单位质量蚯蚓消化吸收的有机质量, 消化率为消化量与摄食量的比值. 比较不同区块的生长环境条件下蚯蚓的摄食、消化、排泄特性与牛粪蚯蚓之间的差别(图 11).

牛粪的 OM、蚓粪 OM、蚓粪产率、摄食量和

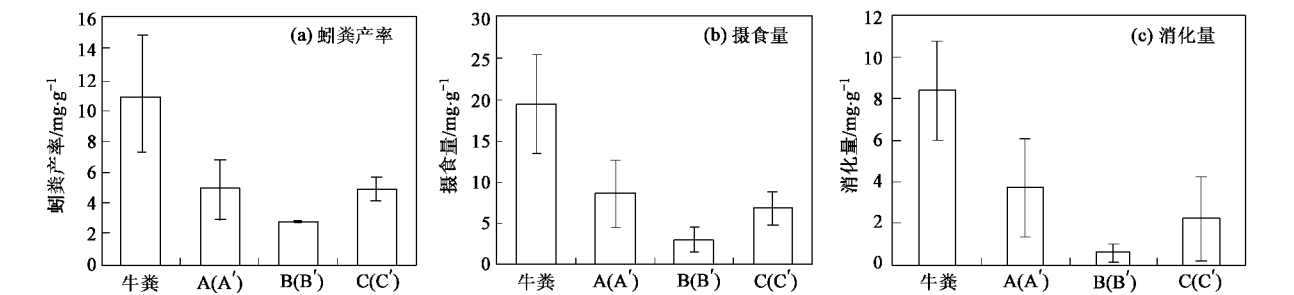


图 11 驯化阶段蚓粪产率、蚯蚓摄食量、蚯蚓消化量

Fig. 11 Manure yield, Food-taken, Food-digested in domestication stage

消化量与生物膜污泥的对应值之间存在显著性差异. 相对于生物膜污泥而言, 牛粪的 OM 较高, 牛粪经蚯蚓消化后 OM 的下降绝对值也高, 经计算单位蚯蚓可从牛粪中摄食 $19.43 \text{ mg} \pm 6.18 \text{ mg}$ 的有机质, 其中消化吸收为 $8.34 \text{ mg} \pm 2.58 \text{ mg}$, 排泄 $11.10 \text{ mg} \pm 3.71 \text{ mg}$, 而滤池中的蚯蚓摄食量、消化量和排泄量都要小得多. 李淑琴等^[21]发现饲料营养中的能量对采食影响较大, 高能量日粮比低能量日粮的干物质采食提高 11%. 牛粪的有机质含量高, 能量大, 故蚯蚓的摄食量大. 同时蚯蚓对牛粪中的有机营养物质利用率高, 消化率可达 42.90%, 可用于生物量增长和生命活动.

蚯蚓在滤池中的摄食和排泄不仅受食料组成的影响, 还受温度、含水率、水力冲击干扰、蚯蚓密度等多种因素的影响, 不同区块的环境条件不同, 蚯蚓的摄食和消化水平也不同. 将三区块蚯蚓的摄食量、蚓粪产率、消化量和消化率进行比较发现, 三区块蚯蚓大小顺序为 $A(A') > C(C') > B(B')$, 而蚓粪产率的大小顺序则恰恰相反. 在食料相同的前提下, $A(A')$ 区蚯蚓的摄食量最大, 其值为 $8.61 \text{ mg/g} \pm 2.84 \text{ mg/g}$, 其中有 $3.71 \text{ mg} \pm 1.28 \text{ mg}$ 被消化, 消化率可达 43.14%, 与牛粪中蚯蚓食料消化率相当, 并且其蚓粪 OM 最低, 其值为 $43.86\% \pm 4.30\%$, 稳定性程度高. $B(B')$ 区为蚯蚓生长最不利条件区, 水力冲击干扰因素大, 尽管该区蚯蚓密度最小, 单位质量蚯蚓可供给食料多, 但蚯蚓的摄食量小, 只有 $3.07 \text{ mg/g} \pm 0.96 \text{ mg/g}$, 且有机消化量和消化率小, 蚓粪 OM 含量高, 不利于污泥的稳定化过程.

要提高蚯蚓对污泥的总消化量, 可通过 2 种途径: 一是提高单位质量蚯蚓的有机消化量, 二是提高蚯蚓数量(密度). 鉴于 $B(B')$ 区的环境条件导致单位质量的蚯蚓消化量低, 因此, 在一定范围内, 采取措施提高滤池内蚯蚓的密度并使蚯蚓分布均匀将提高污泥的处理效率. 条件适宜时, $A(A')$ 和 $C(C')$ 区的蚯蚓向 $B(B')$ 区移动, 摄食后回到原处, 对食料中有机质进行消化吸收, 加速滤池中污泥的稳定化过程. 另外, 爬行移动过程增加了蚯蚓自身的能量损耗, 有利于增大摄食量, 提高消化率. 至此, 通过自然环境和布水区条件的改善使整个蚯蚓生态滤池处于一个动态利用污泥有机质的模式中.

2.4.2 呼吸率

呼吸率(以 CO_2 计)是表征蚯蚓生理活性的重要参数, 代谢旺盛, 呼吸率高. 以滤池 $B(B')$ 区中的蚯蚓与原样蚯蚓的呼吸率作比较, 见图 12. 从中可

见, 牛粪蚯蚓的呼吸率基本跟室外温度曲线趋势一致, 第 13、20 d 的降温对牛粪蚯蚓的影响较大, 呼吸率明显下降, 从第 8 d 的 $(1.82 \pm 0.15) \times 10^{-3} \text{ mmol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 下降到 $(0.74 \pm 0.01) \times 10^{-3} \text{ mmol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 和 $(0.84 \pm 0.02) \times 10^{-3} \text{ mmol}/(\text{g} \cdot \text{h})$. 第 27 d 开始气温回升, 呼吸率又回到正常水平. 由于进水对温度的调节作用, 第 13、20 d 滤池中的温度不至过低, 故滤池中蚯蚓的呼吸速率尽管有一定程度的下降, 但与牛粪蚯蚓呈显著性差异. 王玲等^[22]研究发现变温动物的呼吸率在不同温度范围内对温度的敏感性不一致. 本试验中蚯蚓呼吸率在 15°C 以下出现大幅度下降, 说明低于该温度蚯蚓的生理活性下降快, 不利于蚯蚓代谢处理污水污泥.

第 4、8、27、41、46 d 两蚯蚓的呼吸率差异不明显, 第 34、51、58 d 滤池中蚯蚓呼吸率比原样中蚯蚓高. 这是由于第 34、58 d 出现降水天气, 降水对滤池的冲刷作用同时也是一个“充氧”的过程, 滤池中泥沙混合物的含水率增大, 溶解氧增大, 有利于氧气扩散到体表加速蚯蚓的呼吸代谢.

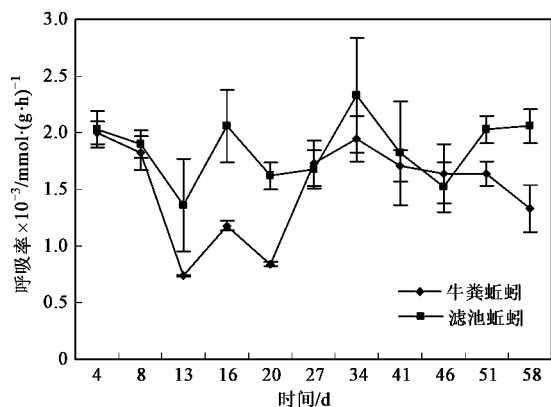


图 12 驯化阶段滤池中蚯蚓呼吸率变化

Fig. 12 Respiratory rate in domestication stage

3 结论

(1) 由于受到自然环境和滤池环境的胁迫, 蚯蚓投加后数量和生物量出现逐渐下降的趋势. 一旦条件适宜, 幼蚓的孵化可以补充滤池内蚯蚓的数量和生物量.

(2) 投加初期蚯蚓在滤池内分布很不均匀, 布水区的蚯蚓数量较少, 周边非布水区数量较多, 但随着温度的升高, 周边的蚯蚓逐渐向布水区移动, 投加 58 d 后蚯蚓分布较为均匀.

(3) 在自然条件相同的前提下, 含水率是反应各区蚯蚓生长微环境的主要因素之一. 蚯蚓密度和含

水率之间存在着极显著负相关,在蚯蚓生物滤池各区块的微环境中,含水率越大,蚯蚓密度越小.含水率与质量范围 < 0.1 g 的个体比例呈极显著负相关,与 0.1 ~ 0.2 g 蚯蚓个体比例呈显著正相关.说明在高含水率区块质量 < 0.1 g 的个体较难存活,而 0.1 ~ 0.2 g 的蚯蚓根据自身需要可以在区块间自由移动,在高含水率区块石英砂持泥率较高,蚯蚓可以获得更多的食料满足自身生命活动的需要.

(4)温度、日平均降水量和降水强度积分 3 个自然影响因子对蚯蚓各生态指标的影响均不显著.说明相对于人为控制因素,自然因素的作用相对较弱.本试验驯化阶段蚯蚓的数量、平均质量、总生物量等受滤池内人为环境因素的影响大大超过了自然因素的影响,池内蚯蚓受到该条件的胁迫,生长规律和种群结构遭到一定程度的破坏.

(5)要提高蚯蚓对污泥的总消化量,可通过 2 种途径:一是提高单位质量蚯蚓的有机消化量,二是提高蚯蚓数量(密度).鉴于 B(B')区的环境条件导致单位质量的蚯蚓消化量低,因此,在一定范围内,采取措施提高滤池内蚯蚓的密度并使蚯蚓分布均匀将提高污泥的处理效率.

(6)温度低于 15℃时,蚯蚓呼吸率变化较为敏感,出现大幅度下降,不利于蚯蚓代谢处理污水污泥.降水对滤池的冲刷作用同时也是一个“充氧”的过程,滤池中泥沙混合物的含水率增大,溶解氧增大,有利于氧气扩散到体表加速蚯蚓的呼吸代谢.

参考文献:

[1] 吴敏,杨健.蚯蚓生态床处理剩余污泥[J].中国给水排水,2003,19(5):59-60.

[2] 吴敏,杨健,马运才,等.生物-生态过滤工艺处理城镇污水[J].中国给水排水,2002,18(4):37-39.

[3] 吴敏,马小杰,杨健.蚯蚓生物反应器污泥减量与稳定效果试验研究[J].环境污染与防治,2007,29(6):401-405.

[4] 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.

[5] Kaushal B R, Bisht S P S, Kalia S. Population dynamics of the earthworm *Amyntas alexandri* (Megascolecidae: Annelida) in

cultivated soils of the Kumaun Himalayas[J]. Applied Soil Ecology, 1995, 2(2):125-130.

[6] Shakir S H, Dindal D L. Density and biomass of earthworms in forest and herbaceous microecosystems in central New York, North America [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1997, 29(3):275-285.

[7] 刘满强,胡锋,陈小云,等.退化红壤不同植被恢复方式对蚯蚓种群的影响[J].应用生态学报,2004,15(11):2152-2156.

[8] Aira M, Monroy F, Domínguez J. C to N ratio strongly affects population structure of *Eisenia foetida* in vermicomposting systems [J]. European Journal of Soil Biology, 2006, 42(S1): 127-131.

[9] 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(2):248-254.

[10] Ndegwa P M, Thompson S A. Effects of C-to-N ratio on vermicomposting of biosolids[J]. Bioresource Technology, 2000, 75(1):7-12.

[11] 余向阳,王冬兰,徐敦明,等.酰胺类除草剂与四种杀虫剂对蚯蚓的联合毒性[J].中国环境科学,2006,26(SI):117-120.

[12] 赵丽,邱江平,沈嘉林,等.重金属隔、铜对蚯蚓的急性毒性试验[J].上海交通大学(农业科学版),2005,23(4):366-370.

[13] 孙振钧.蚯蚓反应器与废弃物肥料化技术[M].北京:化学工业出版社,2004.

[14] 仓龙,李辉信,胡锋.赤子爱胜蚓处理畜禽的最适湿度和接种密度研究[J].农村生态环境,2002,18(3):38-42.

[15] 国家环保总局.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.

[16] 王关禄,张国治.土壤知识与土壤普查技术[M].北京:水利电力出版社,1983.14-36.

[17] 许光辉.土壤微生物分析方法手册[M].北京:中国农业出版社,1986.

[18] 南京农业大学.土壤氨化分析[M].(第二版).北京:农业出版社,1992.

[19] Edwards C A, Bohlen P J. Biology and ecology of earthworms[M]. London: Chapman and Hall, 1996.

[20] 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, *Polypherega elangalu* (Megascolecidae) [J]. Soil Biol Biochem, 1997, 29:335-339.

[21] 李淑琴,白虹,裴正洁.影响肉牛采食量的主要因素[J].黑龙江畜牧兽医,1995,20(4):114-115.

[22] 王玲,陈爱华,赵啸,等.温度和体重对双齿围沙蚕呼吸和排泄的影响[J].大连水产学院学报,2004,19(3):176-181.