

城市污水人工土快滤处理系统的生物修复

肖 乡, 崔理华

(华南农业大学资环学院, 广东 广州 510642)

摘 要: 针对人工土快滤床长期运行在淹水状况下由于入水有机物浓度大于系统处理能力而造成的有机质积累和堵塞现象,通过国内外资料调研,从微生物、植物、土壤动物 3 个方面,讨论了应用生物修复技术来解决上述问题的可能性。
关键词: 人工土快滤床; 有机质积累; 堵塞; 生物修复
中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 0267(2001)05 -

Bio - Remediation of Artificial Quick - Filter System for Treatment of Municipal Sewage

XIAO Xiang, CUI Li-hua
(College of Environment and Resources, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642 China)

Abstract: If an artificial quick - filter system for treatment of municipal sewage has been running for a long time, it is liable easily being blocked, especially when the concentration of organic pollutants in the sewage is over the load of the system. The present paper reviews possibility of regeneration for the artificial system blocked by bioremediation including microbial, botanical and creatural methods.
Keywords: artificial quick - filter system; accumulation of organic matter; blockage; bioremediation

利用土地处理污水的方法早在古雅典时期就有记载。1559 年普鲁士的 Bunslau 建立了第一个污水灌溉的土地设施,并连续运行了 300 年之久。之后经历了几个世纪的应用与发展,又出现了氧化塘、慢速渗滤、地表漫流、快速渗滤以及现今发展起来的湿地处理系统。由于污水土地处理具有占地面积大,场地条件要求严格和受气候条件影响等缺点,使得其在发展应用上受到限制。而采用人工配制的土壤,既可以发挥土地处理的优势,改善排水和通风状况,从而获得了较高的水力负荷和处理效率。同时又可以减少其占地面积,不受自然条件的限制,使之应用起来更为灵活方便^[1]。但随着日益增多的城市污水量以及污水多种难降解有机物(如洗涤剂、油料等)、重金属等有毒物的出现,使得土地处理系统又面临着新的挑战。由于人工土快滤床是专门用于处理城市污水的,当城市污水的有机污染物浓度增大,必然会加重处理系统的有机负荷。一旦有机负荷超过了人工土滤床中微生物的生物氧化分解能力,就必然会导致有机污染物在人工土快滤处理床中积累。污水中部分难降解的有机污染物会经微生物的轻度改变而直接转化为慢分解的腐殖质成分。当有机质积累达 5% 以上时,就会产生黑色生物粘膜,造成人工土滤床的堵塞。既降低了处理系统的渗透速率和处理效率,又影响处理床的正常运行。因此如何使堵塞的人工土快滤床恢复处理能力或者增强其处理效率,并使之能够

避免有机质积累和堵塞现象,适应各种变化保持稳定的运行状态,成为目前人工土快滤处理系统发展的一个有待解决的问题。

1 微生物修复

通常在重金属污染修复中主要是利用微生物对重金属的吸附和生物氧化还原作用^[6]。已知有许多异氧微生物在好氧或厌氧条件下可将 Cr^{6+} 还原为 Cr^{3+} 从而降低铬的毒性。许多研究还显示有机污染物如芳香族化合物可以作为还原 Cr^{6+} 的电子供体。这一结果表明微生物在修复有机物污染的同时,还可以还原 Cr^{6+} 为 Cr^{3+} ^[6]。最近 Cantafio 等发现微生物在 *Thauera Selenatis* 可除去污水中 98% 以上的硒,同时经反硝化作用除去污水中的 NO_3^- 。但由于微生物的生物量小难于收集,且其吸收在体内的重金属有可能经过代谢或死亡而又释放回环境中,因而微生物修复在处理重金属污染方面发展有限。而在有机污染的处理方面,主要是依靠微生物的吸收和分解氧化作用经细胞的分解同化作用使有机物转变为细胞的组成部分或者变为 H_2O 和 CO_2 排出体外,从而实现对有机污染的修复。人工土滤床是一个以细菌为主的生态系统,除了利用土壤对污染物的吸附过滤阻截作用外,大部分是靠微生物体的生物代谢作用^[11]。有研究表明,在人工土快滤床对 COD 的去除作用中,有 42.3% 是生物代谢的作用。相对于没有生物参与的单纯渗滤作用提高了 34%。在人工土滤床中除了来自土壤本身的土著微生物外,还有来自污水的微生物。但这两种来源的微生物在

收稿日期: 2000 - 11 - 18
基金项目: 广东省自然科学基金(990721)
作者简介: 肖乡(1976—),女,硕士生,华南农业大学资源环境学院环境工程专业,研究方向为水污染控制工程和污水生态处理,已发表论文 1 篇。

人工土滤床中并非是机械组合在一起,而是在污水处理过程中经长期运行驯化后,逐渐形成了自身稳定的,具有较旺盛新陈代谢能力的微生物区系^[11]。因此要解决人工土滤床的有机质积累和堵塞问题就必须从优化微生物组成方面入手。生物强化技术就是以改良微生物组成来改善对污染物的处理效果。目前的生物强化技术主要是指在生物处理系统中投加具有特定功能的微生物来改善原有处理系统的处理效果,充分发挥微生物的潜力,如难降解有机物的去除等^[7]。一般投加到处理系统的微生物可是原处理体系的,经驯化、富集、筛选、培养使原系统中含量较少的微生物数量增多后,以单菌群或混合菌群投加到原处理系统中,从而改变原系统的微生物组成,形成对某些难降解有机物有更强去除效果的稳定微生物体系。另一种方式是向处理系统中投加原来不存在的外源微生物,使体系原本无法处理的污染物得到有效去除。通常这两种方法在生物强化技术的实际应用中都有采用。这主要取决于原有处理系统中的微生物组成和所处的环境。S. Selvaratnam 等人通过在活性污泥法中投加苯降解菌 *Pseudomonas putida* ATCC11172 提高了苯的去除率同时也缩短了驯化时间。系统在 40 d 内可一直保持 95%—100% 的酚去除率,比未加菌的高出 50% 左右^[7]。

土壤的生物修复是生物强化技术最早应用的一个领域。特别是近几年,由于石油泄露和污染物的不合理处置,造成大面积土壤受到难降解有机物的污染。而土壤本身微生物群落的自净能力有限,很难在短期内有效去除这类化合物。因而生物强化技术成为相对于物理化学处理来说简便、有效且价格合理的处理方法^[7]。Shine 等人通过投加 *Clostridium bifermentans* 对 TNT 污染的土壤进行生物修复,达到了良好的效果。Iestan 等人采用了 3 株真菌 *I. lacteus*, *B. adusta* 和 *T. versicolor* 对 PCP 污染的土壤进行生物强化处理,分别达到了 86%、82% 和 90% 的去除率。由于人工土处理系统是以土壤作为处理主体,因此要对此系统进行生物强化处理就必须从土壤修复着手。在我国对于人工土快滤床的生物强化技术的实验研究已经开展起来。已有的研究表明,从人工土快滤床中分离、筛选出 10 株对 COD、全氮去除率较高的细菌。并将这些细菌混合,经扩大培养后与人工土混合后运行,发现在投加菌液后 20 d 内,优势菌的数量缓慢增长并趋于稳定。在接种五、六个配水周期后,COD 去除率提高了 45.5%。对于污水中的细菌去除也大有改善,粪大肠杆菌的去除率几乎达 100%^[12]。这一实验证明生物强化技术在很大程度上提高了人工土快滤系统的处理效果。因此向人工土快滤床中投加有机质高效降解菌对于解决人工土滤床有机质积累和堵塞问题是一种切实可行的方法。

2 植物修复

植物修复技术是近几十年刚兴起的,在近几年逐渐成为生物修复中的一个研究热点。很多研究表明利用适当的植物不仅可去除环境中的有机物染物,还可去除环境中的重金属和放射性污染物^[11]。

植物修复适用于大面积、低浓度的污染点位,与微生物相比植物具有生物量大且易于后处理的优势。因而被认为是治

理环境中重金属污染的一个很有前景的选择。植物对重金属的修复作用主要有 3 种方式:植物吸收、植物固定和植物挥发^[5]。在植物吸收方面,目前已发现有 400 多种植物能够超量累积某些特定的重金属。其中以超量累积镍的植物居多^[6]。一些超量累积植物能同时吸收积累多种重金属元素。重金属被植物吸收后,输送并贮存在植物体的地上部分,通过收获和移去植物就可达到去除重金属、切断其在土壤中的迁移和在“食物链”中的传递的目的。同时也可利用超量累积植物对重金属极强的富集能力来回收某些贵重金属,从而避免二次污染达到资源回收利用^[6]。例如用水芹菜对黄金的富集作用对黄金废水进行净化回收。实验表明在废水的黄金浓度为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,水芹菜的根部灰分富集黄金可达 $12\ 164.6 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$,相当于 1.22% 含量^[2]。Y. L. Zhu 等湿地植物风信子吸收一些痕量元素 As(V)、Cd(II)、Cr(VI)、Cu(II)、Ni(II) 和 Se(VI),发现风信子对 Cd 和 Cr 的吸收能力最强,在茎和根中的 Cd 含量可达 371 和 $6\ 103 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW, Cr 的含量可达 119 和 $3\ 951 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW^[13]。植物挥发作用主要是针对一些具有挥发性的重金属如汞、硒等。这些重金属经过植物根系的氧化还原作用由固态或离子转化为可挥发形态,挥发出土壤。Rugh 等将细菌的 Hg^{2+} 还原酶基因导入拟南芥植株,使之耐 Hg 能力大大提高,同时还可将 Hg^{2+} 还原成 Hg^0 从土壤中挥发。但这一工作尚需考虑到释放到大气中的挥发重金属对大气的二次污染。与植物吸收和植物挥发相比,植物固定只是将土壤中的重金属转化为低毒性形态而不是将重金属从土壤中去除。通常植物固定需加入一些添加物质使金属的流动性降低,生物可利用性下降,使金属对生物的毒性降低^[11]。Cotter—Howells 和 Caporn 发现施加磷酸盐可以促使铅在 *Agrostis capillaris* 根际土壤中形成磷酸铅矿。目前,在城市污水中也存在一定浓度的重金属。这些重金属在流入人工土滤床后,一部分被土壤吸附固定,一部分则会随渗滤水流出。因此在人工土滤床上种植植物可增强对污水中重金属的去除能力。

通常对于环境中有机污染的生物去除多采用微生物来完成。一方面是因为植物生长期长、去除有机物比较困难,短时期内达不到良好效果。另一方面有机物在植物体内的形态较难分析,其中间代谢产物也比较复杂。但在现场修复中植物的适用性更强。近年来有关这方面的研究报道也很多,有的已达野外应用水平。植物对有机物的去除作用主要是植物吸收、释放分泌物和酶以及根区微生物的矿化作用^[11]。植物对有机物的吸收作用和有机物的亲脂性有直接关系。这些化合物被吸收后,部分可被分解但大多以一种很少能被植物利用的形式束缚于植物组织内或转化为无毒性的中间代谢产物如木质素储存在植物细胞中^[13]。Bucken 等研究发现植物可直接吸收环境中微量的除草剂阿特拉津。由于植物能释放分泌物和酶到土壤中,一方面可作为根际微生物养分的来源和刺激根区微生物的活性,加速对土壤中有机物的降解。另一方面也可直接分解一些有害化合物,植物死亡后释放到土壤中的酶仍可继续发挥作用。经研究表明,植物根区微生物在数量和种类上明显比空白土壤中的多^[4]。Reilley 等在 1996 年研究了多环芳烃的降解,发

现植物根使根区微生物密度增加,多环芳烃的降解增强。美国佐治亚洲 Athens 的 EPA 实验室对来源于植物的五种酶进行研究发现,硝酸还原酶和漆酶能分解炸药废物 TNT,并将破碎的环状结构结合到植物材料中或有机物残片中,变成沉积有机物的一部分。

在植物修复技术中植物根系的新陈代谢、呼吸作用和机械作用同样具有重要的作用。植物根系的新陈代谢作用产生的残留物提高了土壤的有机质,为土壤微生物提供了充足的养分,使微生物大量繁殖。而植物根系的呼吸作用使根圈小环境既有好氧区又有兼氧和厌氧区,为好氧和厌氧菌提供了生存环境,这样就使得微生物的种类大大增加^[4]。同时好氧和厌氧环境交替有益于 N、P 的去除。近年的湿地系统就是利用植物根系创造的微生物环境来降低污染水体中的 N、P,改善水体的富营养化。日本的田佃真佐子等研究了芦苇栽植湿地对河流水的去氮除磷效果。发现流入水中约 30% 的总磷(TP, 0.25—0.48 mg · L⁻¹)和 20% 的总氮(TN, 1.2—11 mg · L⁻¹)得到去除。美国利用内流湿地处理氮污染水体取得了显著成效,其 NO₃ - N 由 6.6 mg · L⁻¹ 降到 2.0 mg · L⁻¹, 全年氮的去除达 3 kg · hm⁻² · d⁻¹ 约为流入 N 量的 37%^[14]。在我国成都市南郊污水泵站人工土快滤系统上开展的植物种植实验也表明,在人工土滤床上种植水花生和紫云英都能增加处理系统对 N、P 的去除能力^[10]。由于植物具有庞大的根系,其对土壤的机械作用可以改善土壤质地,提高土壤孔隙度,从而增强土壤的渗透速率。同时也可减缓污水沿地表流动的速度,保证地表土不受水流冲刷,有利于水中悬浮物的沉淀,限制了污染物质的移动。植物的地上部分又为水面遮挡阳光,避免藻类大量生长影响处理效果。因而在人工土滤床上种植适当的植物对于提高处理效果、处理能力是可行的。而且组成的土壤 - 植物系统必然会增强系统对环境的耐受性和适应性。另一方面从经济角度来看,这也不失为一项商业化措施。

3 土壤动物修复

在土壤中微生物是分解土壤有机质的主要生物群,但土壤动物也起着不容忽视的作用。在人工土快滤床中的微生物是由接种土壤中微生物和污水中微生物组成的,经运行驯化后,微生物的数量和种类不会有很大变化。长时间运行后人工土快滤床中产生有机质积累,除用植物修复外,还可以考虑用土壤动物(如蚯蚓、昆虫和原生动物等)的捕食来控制生物污泥的生长和有机质的积累。在土壤中土壤动物的作用主要是粉碎或分解地表、地中的植物残体和动物在土壤中取食及移动造成的耕耘作用以及对有机、无机物的混合搅拌作用。蚯蚓是土壤中最常见的杂食性环节动物。它在土壤中不断钻洞挖穴,不断吞食含有机物质的土壤。最早注意蚯蚓对土壤有耕耘作用的是进化论者达尔文,他经过调查发现每年经蚯蚓消化道排出的泥土每公顷约为 8—12 t。这些泥土是蚯蚓吞食的土壤经蚯蚓体内丰富的酶系统的作用后,而形成颗粒状的高度融合的有机无机复合肥——蚓粪^[8,9]。这些营养丰富的颗粒物以及蚯蚓本身运动对土壤的机械作用不仅改良了土壤的肥力

同时提高了土壤的透气性和吸附能力。研究表明,蚯蚓的钻洞行为可使土壤的空气含量从 8% 提高到 30%,土壤孔隙率从 30% 提高到 60%。由于蚯蚓是生活在潮湿的土壤中,通过皮肤进行呼吸。据报导在氧分压低至 2533 Pa 时仍可维持正常的呼吸,在缺氧条件下还能利用体内糖原的嫌气分解为生命活动提供能源。一般蚯蚓在水下可生存 8—10 d,大红蚯蚓甚至能在淹水的土壤中生存 8—12 个月^[8]。因此只要能保证土壤透气性能,选择适当的运行周期,利用养殖蚯蚓来实现污水的土地处理以及减少人工土滤床的有机质积累状况,进而解决堵塞问题是可行的^[16]。目前该法已在法国、智利和国内成功地进行中型试验和生产性规模的应用。罗固源和吉方英等对于蚯蚓在土地处理中的应用进行了多次试验研究,证明了如果采用合理的间歇方式,蚯蚓养殖污水处理在技术上是可行的。同时试验结果表明,蚯蚓养殖污水处理虽不能提高 COD 的去除能力,但蚓粪上丰富负电荷的有机胶体对污水中带正电荷的 NH₄⁺ 有较强亲合力,从而提高了对 NH₄⁺ - N 的去除。

另外,从生态学角度来看,蚯蚓在自然界中扮演着分解者的角色。植物吸收土壤中的肥料元素而生长,植物死亡后或被动物消费后,其残体或动物排泄物又回到土壤中。经土壤中蚯蚓的消化和微生物的分解氧化后,又回到土壤中被植物所吸收利用。这种循环使土壤中肥料元素含量维持在一定水平,从而形成了稳定的土壤肥力与作物生长之间的生态平衡。这对于常规污水土地处理在土壤肥力上难于做到生态恢复的局面开辟了一条新的发展方向。

综上所述,在人工土快滤床上种植植物、养殖蚯蚓不仅能提高处理系统的处理效果,改善土壤渗滤状况、美化环境,同时也可使土地处理系统由运行型转为生产经营型。而微生物强化措施则可以提高处理系统的处理能力,加快对污水中有机质的降解,防止堵塞现象的发生。因此对于城市污水人工土快滤床中有机质积累和堵塞问题从生物修复方面进行解决在理论上是可行的。

参考文献:

[1] 桑伟莲,等. 植物修复研究进展[J]. 环境科学进展,1999,7 (3): 40 - 44.

[2] 范昌发,等. 植物整治研究现状[J]. 环境科学进展,1999,7 (5): 107 - 111.

[3] 龚月桦,等. 植物修复技术及其在环境保护中的应用[J]. 农业环境保护,1998,17(6): 268 - 270.

[4] 金国贤,等. 植物根圈污染生态研究进展[J]. 农村生态环境,2000,16(3): 46 - 50.

[5] 沈德中. 污染土壤的植物修复[J]. 生态学杂志,1998,17(2): 59 - 64.

[6] 沈振国,等. 土壤重金属污染生物修复的研究进展[J]. 农村生态环境,2000,16(2): 39 - 44.

[7] 韩力平,等. 生物强化技术在难降解有机物处理中的应用[J]. 环境科学,1999,20(6): 100 - 102.

[8] 罗固源,等. 污水蚯蚓土地处理与资源回归[J]. 重庆环境科学,1997,19(2): 27 - 29.

- [9] 吉方英, 等. 蚯蚓与污水土地处理试验研究[J]. 重庆环境科学, 1998, **20**(4): 12 – 15.
- [10] 崔理华, 等. 城市污水人工土快滤床与水生植物复合处理系统[J]. 中国环境科学, 2000, **20**(5): 432 – 435.
- [11] 李国学. 城市污水人工土快滤处理与利用系统[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999, 12.
- [12] 李金玲. 城市污水土地处理—人工土层系统中微生物的研究[J]. 北京农业大学硕士论文, 1989.
- [13] Y L Zhu et al. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: H. water hyacinth[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28, JAN – FEB; 339 – 343.
- [14] P G Hunt et al. In – stream wetland mitigation of nitrogen contamination in a USA coastal plain stream[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28, JAN – FEB; 249 – 255.