

# 人工土快滤滤床对耗氧有机 污染物的去除机制\*

田 光 明

(浙江大学环境与资源学院环境工程系, 杭州 310029)

**摘 要** 通过对人工土快滤系统不同组分的灭菌试验和分析滤床落干恢复过程中土壤有机质的变化,对城市生活污水中的耗氧有机物(COD)进入人工土滤床后的去向进行了研究。结果表明,人工土滤床对污水 COD 的去除是生物与非生物共同作用的结果,生物作用机制不仅表现在布水时期的生物降解,更反映在滤床落干期对被截留有机物的分解作用。系统好氧与厌氧微生物的周期监测表明,人工土滤床对污水 COD 的降解作用,不仅有污水微生物的生物降解,还有土壤微生物的矿化分解作用。人工土快滤系统是以好氧生物为主导的生物过程与非生物过程的有机结合。

**关键词** 人工土快滤, 有机污染物, 去除机制

**中图分类号** X703

土壤是一个复杂的生态系统,具有丰富的微生物<sup>[1]</sup>,因而对进入土壤的污染物有很强的净化作用<sup>[2]</sup>。土地处理系统就是利用土壤生态系统的净化功能与工程措施相结合的一类污水处理方法。其投资和运行费用大约只有常规的活性污泥法的 1/5<sup>[3-5]</sup>,对我国大多数城市污水的处理展现出诱人的魅力。然而,由于受自然条件的限制和占地较多以及处理效率较低,使其推广应用受到很大的限制<sup>[6]</sup>。另一方面,随着我国城市化的迅速发展,城市污水的日排放量已超过 1 亿 m<sup>3</sup>,而处理率只有 5%~6%,大量的污水排入自然水体,使水生生态系统遭到破坏<sup>[2]</sup>。面对二级生化处理投资大、耗能和运转费高,我国大多数城镇的现有经济条件是难以承受的现实和传统土地处理系统受自然条件限制的双重形势,我国在“六五”和“七五”攻关期间,开发研制了人工土快速渗滤系统。人工土快滤系统克服了受自然条件制约的不足,而且有更高的水力负荷率和占地少、运行管理灵活方便等优势<sup>[7]</sup>,显示出较强的生命力。但系统长期运行会表现出滤床被堵塞的症状,使水力负荷降低,因而,必须有足够时间的恢复期才能保证污水处理效率的稳定<sup>[8]</sup>。为了改进系统结构、优化其运行管理,本文对人工土快滤系统的滤床去除有机污染物(COD)的机制进行初步探讨,为研究系统的功能强化提供理论依据。

\* 受曹光彪科技发展基金资助(u19923)

收稿日期: 2000-10-14; 收到修改稿日期: 2000-12-22

# 1 材料与方法

## 1.1 试验材料

模拟人工土滤床:分别为直径8cm的硬塑料管和直径20cm的缸瓦管,模拟人工土滤床结构如图1。

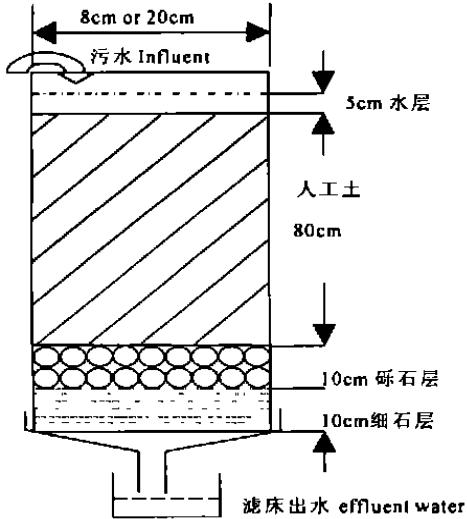


图1 模拟人工土滤床结构示意图

Fig. 1 The structure of ASRI bed

4——人工土不灭菌、污水灭菌

通过对不同处理的COD去除率和土柱表层有机质的变化进行监测分析,了解生物与非生物作用对污水COD的去除。土壤灭菌用氯仿薰蒸法,污水灭菌用100~120℃高压灭菌法(20分钟)。COD的测定用重铬酸钾法,微生物计数采用稀释平板培养法。

1.2.2 滤床对污水有机物去除的主要生物机制研究 采用直径为20cm的土柱,按0~5、5~20、20~40、40~60和60~80(cm)五个层次分别采集土样。对不同层次土壤的好氧菌、厌氧菌、有机质和呼吸强度进行周期性监测,同时监测土壤 $Fe^{2+}$ 的变化。以分析滤床对污水有机物去除的主要生物机制。

1.2.3 过滤作用对污水COD的去除分析 为了单纯分析人工土的过滤作用所去除的污水COD,用0.4 $\mu$ m的微孔滤膜模拟人工土的过滤过程,以避开因生物降解和化学分解及挥发等作用的影响。

1.2.4 土壤氧化还原作用对污水有机物的去除分析 通过对土壤典型氧化还原体系中 $Fe^{2+}$ 的监测,间接讨论土壤氧化还原体系对污水有机物的去除作用。

## 2 结果与讨论

### 2.1 布水时人工土对污水COD的去除机制

污水进入人工土层后受到物理、化学、物理化学和生物化学的综合作用而使COD降低。化学氧化和生物降解使有机物分解转化为低分子的有机物或进一步转变为简单的无机盐,水和二氧化碳。物理和物理化学作用使污水COD阻留于土层中,结果都使出水COD大大降低。本文通过对人工土和污水的灭菌实验来明确人工土滤床对污水有机物

供试污水:取自中国农业大学西校区家属区污水泵房,其 $COD_{Cr}$ 在146.6~403.5 $mg\ L^{-1}$ ,悬浮物在101~360.8 $mg\ L^{-1}$ 。

供试人工土:将沙、草炭和肥沃的菜园土按一定的比例混合组成人工土,其容重为1.41 $g\ cm^{-3}$ 、总孔隙度为43.05%、土壤有机质25.6 $g\ kg^{-1}$ ,阳离子代换量为8.29 $cmol\ kg^{-1}$ ,pH7.3。

### 1.2 试验方法

模拟人工土滤床(如图1)由20cm厚的碎石垫层和80cm厚的人工土层构成。系统运行采用布水8小时、落干64小时的运行周期,布水时用自动控制阀保持土柱表面有5cm的淹水层。

1.2.1 COD的生物与非生物去除机制研究 采用直径为8cm的小土柱进行,设置对人工土和污水分别灭菌与不灭菌的四种不同处理,进行快滤处理效果的比较。

处理1——人工土和污水都不灭菌,处理2——人工土灭菌、污水不灭菌,处理3——人工土和污水都灭菌,处理

COD 的生物与非生物去除作用。

2.1.1 生物降解作用 (1) 生物降解对 COD 的去除, 对污水和人工土分别灭菌和不灭菌处理的试验表明(如表 1、表 2), 人工土滤床对污水 COD 的去除既有生物降解作用, 还有非生物去除作用, 是生物与非生物综合作用的结果。由于污水灭菌过程中污水有机物在高温下变性絮凝而沉淀, 所以用去除率来比较灭菌与非灭菌处理的去除功能。对不同处理 5 次运行结果的统计分析表明(表 1), 单独对人工土或污水灭菌处理的 COD 去除率与正常土柱的去除率没有显著差异, 但各处理的去除率与水土都灭菌处理的去除率比较都达到了极显著水平, 这一结果说明无论是来自污水的微生物还是来自土壤的微生物, 在人工土滤床中都可以有效地去除污水的 COD。表 2 可以看出, 在灌水期间人工土滤床的生物降解作用可去除 34% 的污水 COD, 占 COD 总去除的 42.3%, 其中不仅有污水微生物的降解作用, 还有土壤的微生物净化功能, 而且土壤微生物作用优于污水微生物。这可能是由于土壤微生物种类和各种酶系统更丰富, 它能使进入土壤的有机物得到迅速的分解。

表 1 不同灭菌处理的 COD 去除效果<sup>1)</sup>

Table 1 Effect of sterilization on COD removal

	进水 Influent		处理出水 Effluent			
	原污水 Sewage	灭菌污水 Sterilized sewage	土壤和污水 都不灭菌 Control	土灭菌 Only soil sterilized	水土都灭菌 Both soil and sewage sterilized	只对污水灭菌 Only sewage sterilized
COD(mg L <sup>-1</sup> )	257.0±48.7	189.2±41.2	44.8±13.4	76.9±7.6	101.5±15.4	48.5±11.0
去除率(%) <sup>2)</sup>		24.1±13.6	80.3±9.2	68.1±6.4	45.4±4.0	73.3±7.3
方差分析 ( <i>F</i> <sub>0.05</sub> =4.96)		都灭菌—不灭菌	不灭菌—土灭	土灭—都灭菌	都灭菌—水灭	不灭菌—水灭
<i>F</i> 值		52.136**	1.582	33.92**	46.15**	4.74
显著水平( <i>P</i> )		2.86×10 <sup>-5</sup> **	0.237	0.000167**	4.78×10 <sup>-5</sup> **	0.054

1) 试验期间(5~7月)平均气温在 28~30℃, 水温 23~25℃; 2) 去除率=(进水 COD-出水 COD)/进水 COD×100%

表 2 人工土各种机制对污水的去除功能

Table 2 Contribution of different mechanisms of ARIS to COD removal

	生物去除作用 Biodegradation			非生物作用 Abiotic mechanism	总去除 Total removement
	土壤微生物 Soil organism	污水微生物 Sewage organism	合计 Total		
绝对去除率(%) <sup>1)</sup>	18.5	15.5	34.0	46.4	80.4
相对总去除比率(%)	23.0	19.3	42.3	57.7	100.0
相对生物机制 去除比率(%)	54.5	45.5	100		

- 1) 土壤微生物的去除率=[(污水灭菌去除率-水土都灭菌的去除率)+(不灭菌去除率-土灭菌去除率)]/2  
 污水微生物的去除率=[(土灭菌去除率-水土都灭菌的去除率)+(不灭菌去除率-水灭菌去除率)]/2  
 非生物作用去除率=[都灭菌去除率+(总去除率-生物去除率)]/2

因此人工土快滤处理较单凭污水微生物作用的二级生化处理有更好的 COD 降解效果。这与张小葳得出的人工土滤床土壤微生物可使 BOD<sub>5</sub> 的去除率提高 35.2% 的结果基本一致<sup>(1)</sup>。

(2) 人工土滤床微生物的周期变化, 通常污水生物处理主要分好氧和厌氧两大机制, 人工土滤床运行中对好氧菌和厌氧菌的周期性监测表明, 在整个运行周期中, 既有好氧菌也有厌氧菌, 好氧菌数始终比厌氧菌数多一到两个数量级, 因此认为人工土滤床对 COD 的生物降解是以好氧生物为主导的生物降解过程。

图 2 可以看出好氧菌在布水初期迅速增加, 然后随布水时间加长而减少, 停灌后又迅速增加, 并在落干一定时间后达到最高, 而后又逐渐下降; 厌氧菌则在布水期间和停灌初不断增加, 数量在停灌 2 小时后, 随着土柱沿水层的消失又逐渐减少。这是由于布水初土层中尚有一定数量的 O<sub>2</sub>, 好氧菌不仅从污水中得到充足的营养而且仍有一定的好氧条件, 因而迅速生长繁殖, 随着灌入污水的增加, 人工土层中的好氧菌因 O<sub>2</sub> 不足使生长繁殖受到抑制, 其数量下降, 停灌后土壤迅速落干, 由于通气条件的迅速改善, 好氧菌又以土壤截留的 COD 为碳源得以迅速增长, 并使其得到分解。落干一定时间(约 43 小时)后好氧菌数下降, 可能主要是因为微生物所需的有机碳源减少, 不能再维持庞大的菌群, 即营养条件恶化而使好氧菌的生长繁殖受到抑制。厌氧菌则在布水时因厌氧条件的加强和有机底物的补给而数量不断增加, 落干初期由于土柱表层有一个淹水层, 且有较多的有机物累积, 阻碍了空气的迅速进入, 使其继续维持一定时间的厌氧条件, 而使种群继续增殖, 当淹水层消失、土壤通气条件改善时厌氧菌数量又迅速减少。在整个运行周期中好氧菌和厌氧菌都参与了有机物的代谢, 但厌氧菌数量远不及好氧菌多, 因此认为人工土快滤系统是以好氧生物为主导的生物降解过程。Pell 和 Nyberg 对砂滤的研究也表明, 有机物的好氧分解比厌氧分解更有效<sup>[9]</sup>。T. Okubo 等对土柱淹灌过程中的细菌测定指出, 土柱在淹灌 10 天内都处于好氧状态<sup>[10]</sup>, 这对保持和恢复人工土层处理功能的稳定有重要作用<sup>[11]</sup>。张

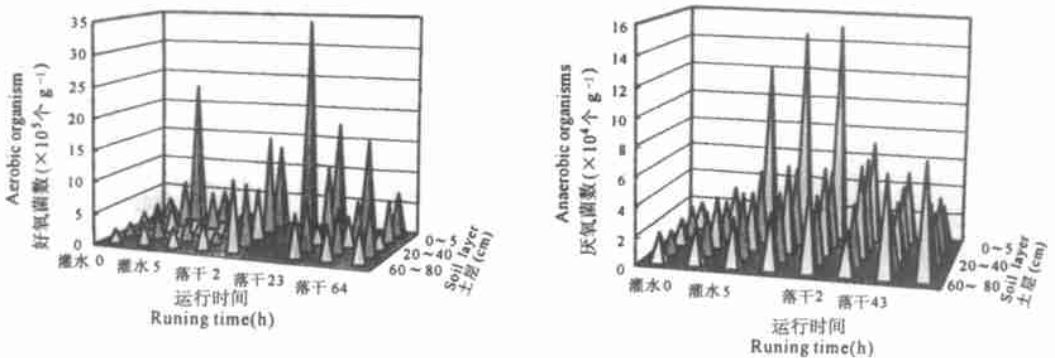


图 2 人工土滤床土壤微生物的周期变化

Fig. 2 Change in soil microorganism in ASRI bed

(1) 张小葳. 人工土层处理污水的调控技术—最佳淹灌与落干时间的研究. 北京农业大学硕士学位论文, 1988. 19

宝莉对上流式布水的人工土柱试验表明, 上流式布水的 COD 去除率低于表面布水<sup>(2)</sup>, 也是由于上流式布水的土柱完全被污水浸泡, 其通气条件远不及表面布水。所以, 人工土快滤系统中的生物分解作用可以认为是一个好氧生物过程, 因此改善人工土滤床的通气状况, 可能将会增强系统对 COD 的去除。

2.1.2 非生物去除机制 灭菌试验表明, 在灌水期人工土滤床对污水 COD 去除的 57% 以上是非生物作用的结果。其作用机制可能有过滤作用、物理及物理化学吸附作用和土壤化学氧化和挥发作用等。人工土的吸附作用、过滤作用和沉淀作用都只是将污水有机物截留在滤床的土壤中, COD 并未从快滤系统中消失, 因此对它们一并以土壤截留作用讨论。

(1) 土壤截留对污水 COD 的去除, 污水的固体悬浮物(SS)在渗滤过程中几乎全被人工土层截留, 去除率高达 96.7%, 这必然会引起对 COD 的去除。为了了解随悬浮物去除的 COD 数量, 避免生物降解作用的干扰, 用 0.45 $\mu$ m 的微孔滤膜过滤污水来模拟人工土对悬浮物的去除, 测定过滤前后的污水 COD。结果表明, 因悬浮物的截留可去除污水 COD 的 36%~48% (41.9%  $\pm$  5.9%) (如表 3)。并且污水的浊度越大, 滤膜随悬浮物截留去除的 COD 率也越高。从表 3 可见灭菌土柱对污水 COD 的绝对去除率都在 40% (46.7%  $\pm$  4.1%) 以上, 相对去除率在 48%~62% (55.1%  $\pm$  7.0%), 反映出截留作用对污水 COD 去除的重要作用。在非灭菌土柱中, 悬浮物的截留会引起土壤孔隙堵塞, 使渗透速率下降, 因而增加污水在滤床中停留时间, 受各种生物与非生物作用使其处理效果更好。

表 3 SS 截留对 COD 的去除(0.45 $\mu$ m 滤膜过滤)

Table 3 COD removal by SS interception (with 0.45 $\mu$ m)

	进污水 Influent	出水 Effluent		
		正常人工土柱	滤膜过滤出水	水土都灭菌
COD (mg L <sup>-1</sup> )	268.0 $\pm$ 21.9	38.0 $\pm$ 13.4	156.2 $\pm$ 20.9	142.4 $\pm$ 11.4
COD 去除率(%) <sup>1)</sup>		85.6 $\pm$ 5.9	41.9 $\pm$ 5.9	46.7 $\pm$ 4.1
占人工土去除率的% <sup>2)</sup>		100	48.9 $\pm$ 4.7	55.1 $\pm$ 7.0

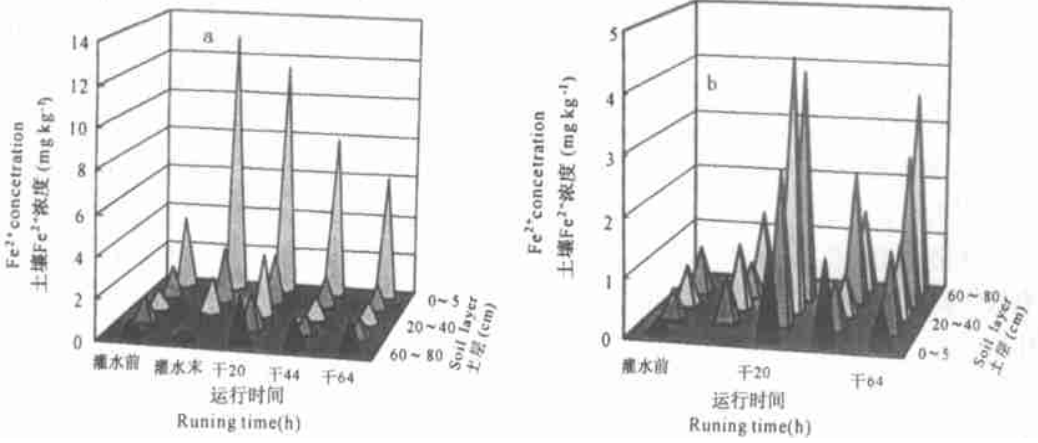
1) COD 去除率 = (污水 COD - 出水 COD) / 污水 COD

2) 滤膜和灭菌土柱的 COD 占正常人工土 COD 去除率的比例

灭菌试验与截留试验综合分析可以看到非生物对 COD 的总去除率平均为 55.1%, 而随 SS 截留去除的 COD 平均只占 48.9%。可见人工土滤床对 COD 的非生物去除不仅仅是物理过滤作用, 还有土壤的吸附、沉淀等物理化学截留作用。

(2) 土壤氧化还原体系对污水 COD 去除的影响, 为了说明土壤氧化还原体系对去除污水 COD 的影响, 对灌停周期中 Fe<sup>2+</sup> 的浓度进行了周期性监测, 并以清水灌土柱作对照, 结果如图 3。在灌水期间, 用清水灌土柱 Fe<sup>2+</sup> 变化波动较小, 而污灌土柱的 Fe<sup>2+</sup> 显著增加, 尤其是表层有机质积累较多的地方。这说明污水有机物对土壤氧化还原体系有明显的影响, 反过来说, 就是土壤氧化还原体系对污水 COD 的去除有明显的作用。

(2) 张宝莉. 城市污水人工土层渗滤处理系统中人工土性质对处理效果的影响. 北京农业大学硕士学位论文, 1989. 6: 26~29



(a) 污灌土柱 sewage irrigation (b) 清水灌土柱 Fresh-water irrigation

图3 人工土 Fe<sup>2+</sup> 的周期变化

Fig. 3 Change in Fe<sup>2+</sup> concentration in ARI bed

## 2.2 落干时人工土层中有机质的变化

前面已经讨论了土壤截留对 COD 的去除,但是这部分 COD 并没有在滤床中消失,而是滞留在人工土层中。如果滤床连续运行,必然造成有机物的积累使滤床堵塞,因此系统运行需要一定时间的落干恢复。七五攻关中试工程用灌水 8 小时—落干 64 小时的运行周期,运行 14 个月并未出现滤床的堵塞。为了说明被截留有机物的变化机制,本文对人工土滤床土壤的有机质进行了周期性监测,结果如图 4,灌水时土壤有机质不断增加停灌后又迅速减少,尤其是表层这种规律更加显著。在整个运行周期中土壤有机质基本保持平衡。这与土壤微生物活性的变化趋势类似(如图 5)。对人工土表层土壤有机质与微生物数量作回归分析表明,二者有显著的正相关关系(相关系数  $r = 0.9685$ ),  $Y = 5.08X + 0.789$  式中,  $X$  为细菌总数,  $Y$  为土壤有机质,这与张祖锡等人的研究结果是一致的<sup>[7]</sup>。土

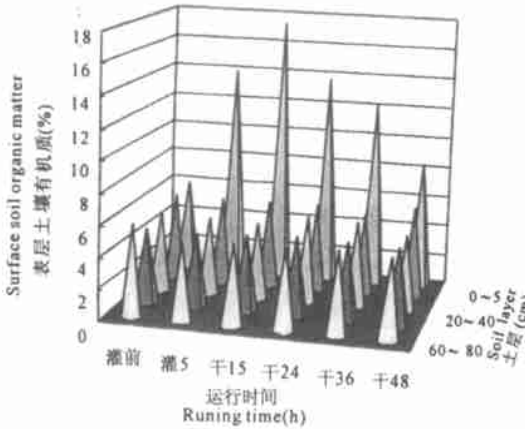


图4 人工土滤床土壤有机质的周期变化

Fig. 4 Change in soil organic matter in ASRI bed

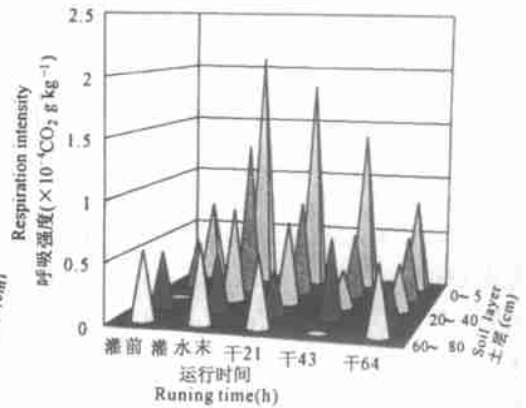


图5 人工土滤床土壤呼吸强度的周期变化

Fig. 5 Change in respiration intensity of soil microorganisms in ASRI bed

壤呼吸强度也与土壤有机质呈明显的正相关关系  $r = 0.7680$ 。这说明被滤床截留的污水有机物(COD)的分解与滤床微生物的数量和种类有密切关系。为了进一步说明有机物的去除机制,对不同灭菌处理土柱的表层有机质进行了周期监测(结果如表4和表5)。结果显示,在人工土滤床正常运行过程中,被截留在表层土壤中的有机物(OM),有85%以上在落干过程中被氧化分解掉。而不同灭菌处理的结果表明,土壤生物对有机物的分解远比污水微生物作用强,而水土全部灭菌的处理也有近10%的有机物减少,说明非生物化学分解和光分解等作用也对有机物的矿化起一定作用。由于被土壤截留的污水有机物在落干过程中受到生物和非生物的分解使整个运行周期中土壤有机质基本保持平衡,而不会造成滤床的堵塞。

表4 不同灭菌处理土壤有机质随滤床落干的变化(表层0~5cm)

Table 4 Change in surface soil organic matter during ASRI running

	不同灭菌处理土柱的表层土壤有机质			
	Surface soil OM of different treatments			
	土和水都不灭菌 Control	土灭菌水不灭菌 Soil sterilized	土灭菌水也灭菌 Both sterilized	土不灭菌水灭菌 Sewage sterilized
灌水前( $\text{g kg}^{-1}$ )	6.6	5.6	6.5	5.6
灌水末( $\text{g kg}^{-1}$ )	15.4	13.1	9.8	8.4
截留有机物( $\text{g kg}^{-1}$ )	8.8	7.5	3.3	2.8
落干末( $\text{g kg}^{-1}$ )	7.8	11.8	9.5	6.6
截留残余( $\text{g kg}^{-1}$ )	1.2	6.2	3.0	1.0
截留有机物的分解率(%) <sup>1)</sup>	86.4	17.3	9.1	64.3

1) 截留有机物的分解率 = (截留有机物 - 截留残余) / 截留有机物 × 100%

表5 土壤有机质的分解机制(表层0~5cm)

Table 5 Decomposition mechanism of soil organic matter (surface soil)

	不同机制的分解率		
	Decomposed ratio of soil OM by different mechanisms		
	生物分解率 Biodegradation	非生物分解率 Abiotic decomposition	总分解率 Total decomposition
绝对分解率% <sup>1)</sup>	77.3	9.1	86.4
相对分解率% <sup>2)</sup>	89.5	10.5	100

1) 非生物分解率 = 水土都灭菌处理的截留分解率, 生物分解率 = 水土都不灭菌得截留分解率 - 非生物分解率

2) 不同机制分解率占总分解率的比例

### 3 结 论

1. 人工土滤床对污水COD的去除是生物降解和非生物去除的共同结果,生物分解作用是滤床得以正常运行的关键,它在灌水时可去除34%的污水COD,在落干时又可使被截留在土层中的污水有机物的90%得到分解。

2. 人工土对 COD 的生物降解是以好氧生物过程为主导的生物降解。

3. 土壤截留是污水 COD 去除的重要途径, 它可去除 50% 的 COD, 土壤氧化还原体系对污水 COD 的去除有明显的影响。

4. 被截留在人工土滤床中的有机污染物 COD, 在系统落干过程中绝大部分被分解矿化, 土壤有机质在整个运行周期中基本平衡, 因而, 没有发生滤床的堵塞。

### 参 考 文 献

1. 陈文新主编. 环境微生物学. 北京: 北京农业大学出版社, 1990. 18~ 25
2. 金岚主编. 环境生态学. 北京: 高等教育出版社, 1992. 232~ 240
3. 国家环境保护科技标准司编. 城市污水土地处理技术指南. 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 145~ 146
4. 周思毅. 试论城市污水土地处理系统在我国的发展前景. 环境科学动态, 1988, (4): 6~ 11
5. 周思毅. 试论城市污水土地处理系统在我国的发展前景. 环境科学动态, 1988, (6): 9~ 13
6. OWEN W F 著, 章北平等译. 污水处理耗能与效能. 北京: 能源出版社, 1989
7. 张祖锡, 白瑛. 城市污水人工土快滤处理技术. 北京: 中国科技出版社, 1991
8. 白 瑛, 张祖锡编著. 灌溉水污染及其效应. 北京: 北京农业大学出版社, 1988. 282~ 294
9. Pell M, Fred Nyberg. Infiltration wastewater in a newly started pilot sand filter system. I. Reduction of organic matter and phosphorus. J. Environ. Qual. 1989, 18(4): 451~ 457
10. Okubo K and J Matsumoto et al. Biological clogging of sand and changes of organic constituents during artificial recharge. Water Res. 1983, 17(7): 813~ 821
11. Stephen R Hutchins, Mason BTomson and John T W *et al.* Anaerobic inhibition of trace organic compound removal during rapid infiltration of wastewater. Appl. Environ. Microbiol., 1984, 48(5): 1046~ 1048

## MECHANISM OF COD REMOVAL IN ARTIFICIAL RAPID INFILTRATION SYSTEM

Tian Guang-ming

(College of Environment and Resource, Zhejiang University, Hangzhou, 310029)

### Summary

On an Artificial Soil Rapid Infiltration (ASRI) system, a new effective method for disposing domestic wastewater, mechanisms of COD removal in the system were studied. The result showed that COD removal in ASRI contributed to biodegradation and abiotic interception when wastewater was flooding the bed. Abiotic interception such as physical infiltration, adsorption and soil fixation intercepted and captured COD in the ASRI bed, in which the COD was decomposed when the water was drained. Periodic monitoring of organisms showed that both aerobe and anaerobe, which came from soil and sewage, played an important role in COD removal and aerobic biodegradation was the dominant action in the whole cycle of the ASRI system.

**Key words** Artificial Soil Rapid Infiltration (ASRI), Chemical Oxygen Demand (COD), Removal mechanism