

城市污水人工土快滤处理系统的 进水水质条件研究

崔理华¹, 朱夕珍¹, 李金铃², 张宝莉², 刘 英², 李国学²

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广东 广州 510642; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘 要: 利用人工土柱和中试工程开展了人工土快滤处理系统的进水水质试验。试验结果表明, 人工土滤床对进水 SS 浓度要求较严, 其允许值为 $60\text{--}80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 中试工程前处理构筑物对 SS 去除率高达 75%, 处理系统进水 SS 浓度可达 $220\text{--}390\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。人工土滤床冬季进水 BOD_5 浓度要求在 $180\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 处理系统进水 BOD_5 浓度可达 $250\text{--}500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。人工土滤床最佳进水 COD 浓度为 $200\text{--}300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 处理系统进水 COD 浓度为 $400\text{--}700\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

关键词: 城市污水; 人工土; 生物滤床; 进水水质; 动力学

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000 – 0267(2002)03 – 0228 – 04

Influent Quality of Rapid Infiltration System Using Artificial Soil for Treating Municipal Wastewater

CUI Li-hua¹, ZHU Xi-zhen¹, LI Jin-ling², ZHANG Bao-li², LIU Ying², LI Guo-xue²

(1. College of Natural Resource & Environmental Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, P. R. China;

2. College of Natural Resource & Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100094, P. R. China)

Abstract: An influent quality experiment of artificial soil rapid infiltration system has been conducted by using both soil column and pilot – scale plant filled with artificial soil. The result showed that the requirement of artificial soil filter for influent SS concentration was stringent, and its permissive range was in $60\text{--}80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. As the removal efficiency of preliminary treatment constructs of pilot – scale plant for SS was about 75%, the range of influent SS concentration for treatment system was in a range of $220\text{--}390\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The range of influent BOD_5 concentration for treatment system was $250\text{--}500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, but it must be low than $180\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for artificial soil filter in winter. The range of influent COD concentration for treatment system was $400\text{--}700\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and the optimum influent COD concentration for artificial soil filter was $200\text{--}300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Keywords: municipal wastewater; artificial soil; biofilter; influent quality; kinetics

人工土快滤处理系统也是一种土地处理方法, 由于其所采用的填料——人工土壤也具有砂质土壤的特性, 悬浮物 (SS) 随污水进入滤床, 可能会造成土壤孔隙堵塞, 堵塞程度常随悬浮物自身组成和颗粒粗细的不同而异。有机物含量较多, 且颗粒粗大者, 容易引起土表结皮, 而细小的矿物质颗粒则容易穿过土表, 使土体堵塞。上述两种堵塞现象均影响人工土的处理功能, 以致降低渗透速率和系统的水力负荷^[1, 2]。其次, 由于人工土滤床不采用机械曝气, 其耗氧处理能力受到供氧能力的限制, 因而对进水 COD 和 BOD_5 浓度具有一定的要求。本项研究的目的是探讨污水中

SS 与人工土滤床水力传导能力的关系, 提出滤床进水的 SS 浓度指标, 通过人工土滤床对污水中耗氧有机物的去除能力研究, 探讨人工土快滤处理系统的有机污染负荷能力, 提出系统进水中的 COD 和 BOD_5 浓度范围。

1 材料与方 法

1.1 模拟滤床的土柱试验

用 $d = 8\text{ cm}$, $h = 120\text{ cm}$ 的人工土柱处理不同浓度梯度的耗氧有机污染物和悬浮物的污水, COD 为 5 个梯度, 其范围为 $100\text{--}1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。SS 为 7 个梯度, 其范围为 $30\text{--}190\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。各处理设 3 个重复, 按 1: 8 湿干比, 配水周期为 3 d 方式运行。同时观测进水与出水中 COD、SS 浓度与渗滤速率 K_t 、 K_{I0} 的关系以

及人工土层对 COD、SS 的去除效果, 确定滤床的进水浓度要求。

1.2 中试滤床试验

供试原污水经调节沉淀池和升流式污泥水解池等前处理后再进入 3 块总面积为 112 m² 的人工土滤床进行二级处理, 按 1: 8 湿干比, 配水周期为 3 d 方式运行了 2 年, 定期监测进水与出水中 COD、BOD₅ 和 SS 浓度。

1.3 供试人工土壤特征

土柱小试采用砾质细砂土和粗砂土, 中试滤床采用砾质粗砂土。

1.4 供试污水水质

试验采用的污水是北京西郊万泉河流域圆明园东排放口的市政污水, 其水质状况见表 1。

表 1 万泉河市政污水浓度 (mg · L⁻¹)
Table 1 The concentrations of pollutants in the municipal wastewater discharged into the Wan - Quan - He River (mg · L⁻¹)

项目	春季	夏季	秋季	冬季	年平均
COD	435	381	345	459	405
BOD ₅	121	100	91	119	108
SS	201	245	203	253	226
TKN	29. 5	28. 5	31. 5	32. 6	30. 5
PO ₄ ³⁻ - P	1. 40	1. 16	1. 22	1. 27	1. 26

2 结果与讨论

2.1 对进水悬浮物(SS)浓度的要求

2.1.1 人工土快滤床对 SS 进水浓度要求

采用不同 SS 浓度梯度的污水进行人工土渗滤柱处理模拟试验结果如表 2。试验结果数据分析悬浮物 (SS) 与人工土滤床渗滤速率 (*Kt*) 的相关关系, 统计结果表明, 二者呈负指数关系, 达极显著相关。

$$Kt = a \cdot e^{b \cdot ss}$$

(1)

粗砂土 *a* = 0. 385 9, *b* = - 0. 009 7, *r* = - 0. 982 2。砾质粗砂土 *a* = 0. 629 0, *b* = - 0. 008 6, *r* = - 0. 970 8。

表 2 进水 SS 浓度对人工土生物滤床渗滤速率的影响 (cm · min⁻¹)
Table 2 Effects of SS contents in the influent on the rate of infiltration of the artificial soil biofilter (cm · min⁻¹)

进水 SS 浓度 /mg · L ⁻¹	33. 7	45. 6	51. 3	67. 7	102	105	118	129	186
粗砂土	0. 287	0. 260	0. 212	0. 192	0. 130	0. 140	0. 130	0. 131	0. 058
砾质粗砂土	0. 539	0. 488	0. 398	0. 361	0. 244	0. 263	0. 244	0. 246	0. 109

2.2 对进水 BOD₅ 浓度的要求

2.2.1 人工土快滤床对进水 BOD₅ 浓度的要求

废水中有机物的分解一般分为两个阶段。第一阶段称为碳氧化阶段, 主要是不含氮有机物的氧化,

将滤床连续运转的实测进水 SS 数据代入 (1) 式, 求出两种配比的人工土 (粗砂土和砾质粗砂土) 相应的 *Kt* 值 (见表 3)。根据对滤床 (采用砾质粗砂土) *Kt* 的不同要求, 我们确定滤床进水水质要求为 60—80 mg · L⁻¹ 以内, 此时的 *Kt* 值可维持在 0. 3 cm · min⁻¹ 以上, 滤床出水达标率在 95% 以上。

表 3 生物滤床进水 SS 浓度 (mg · L⁻¹) 及其出水达标率
Table 3 SS contents of the influent in the biofilter and its effluent quality compared with the control standard

SS 浓度	次数	粗砂土	砾质粗砂土	出水达标率 %
90—99	80	0. 143	0. 266	91. 2
80—89	78	0. 159	0. 290	91. 1
70—79	72	0. 175	0. 317	95. 3
60—69	66	0. 194	0. 345	97. 0
50—59	52	0. 214	0. 376	96. 2
<50	29	0. 237	0. 410	96. 6

2.1.2 处理系统对进水 SS 浓度要求

人工土快滤处理系统对 SS 的去除包括前处理和人工土滤床两部分的作用。其中前处理包括有引水渠、调节沉淀池和升流式污泥水解池的作用。中试工程正常运行 2 年的结果表明 (见表 4), 本系统前处理部分对 SS 的平均去除率为 75%。现以人工土滤床对 SS 进水要求 (60—80 mg · L⁻¹) 为基础计算, 求出人工土快滤处理系统对污水 SS 浓度的要求如表 4。其范围在 220—390 mg · L⁻¹ 之间, 完全适合于处理城市污水。

表 4 人工土快滤处理系统的进水 SS 浓度要求
Table 4 The requirement on influent SS concentration for the artificial soil rapid infiltration treatment system

季节	水力负荷率 /m	原污水 /mg · L ⁻¹	升流池出水 /mg · L ⁻¹	前处理去除率 /%	系统进水要求 /mg · L ⁻¹
春季	51. 8	201	53. 2	73. 5	268—357
夏季	69. 9	245	50. 0	79. 6	249—332
秋季	47. 1	183	41. 0	77. 6	226—302
冬季	38. 9	253	60. 9	75. 9	294—392
平均	208	226	54. 3	75. 7	259—346

此阶段消耗的氧量为碳化需氧量。第二阶段即消化过程, 所需氧量称为硝化需氧量。BOD₅ 仅仅是第一阶段的碳化需氧量, 不包括硝化需氧量。

在污水生物处理过程中, 有机物的降解过程

(BOD₅ 的变化)具有一级反应动力学性质——反应速度与有机物浓度成正比。可以用有机物质生物氧化速率与 t 时间剩余有机物浓度成正比来表达, 即 $dC/dt = -kC$, 经积分得式(2)。从而表明在一定温度下某有机污染物的剩余浓度, 即排出水浓度与其反应时间 t 呈负指数相关。

$$C_t = C_0e^{-kt}$$

(2)

式中: C_t —— t 时刻的 BOD₅ 浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);
 C_0 ——起始时的 BOD₅ 浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);
 k ——反应速率常数 (min^{-1});
 t ——反应时间, 即污水在人工土层中的滞留时间(min)。

将人工土快滤系统中试运转的实测进、出水中 BOD₅ 数值 (C_0 与 C_t) 及污水流经滤床所需时间 (t) 代入式(2)求得在 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 条件下的反应速率常数 k (见表 5), 平均为 0.1025 min^{-1} , 其 $S = 5.32 \times 10^{-4}$, 变异系数 (CV) 为 0.519% 。表 5 数据表明, 在一定温度条件下, 不同进水浓度污水降解过程的反应速率常数 k 值非常接近。因此人工土快滤床中 BOD₅ 的降解具有一级反应动力学特征。

表 5 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 条件下人工土柱的 BOD₅ 反应速率常数

Table 5 Constant factor of BOD₅ reaction rate in the artificial soil column at temperature of $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$

测定次数	进水浓度 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	出水浓度 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	渗滤速率 $/\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$	出水时间 $/\text{min}$	反应速率常数 $/\text{min}^{-1}$
1	75.2	1.54	0.461	38	0.1023
2	76.2	0.380	0.337	52	0.1019
3	75.7	1.68	0.473	37	0.1029
4	115	0.760	0.357	49	0.1025
5	88.6	3.99	0.583	30	0.1033
6	98.2	1.66	0.438	40	0.1020
7	107	6.71	0.648	27	0.1025

污水在人工土快滤床中的滞留时间 t , 可根据人工土滤床厚度 (L) 与平均孔径流速 (V) 之比计算出来, 如式(3):

$$t = L/V \quad V = Kt/\rho$$

(3)

式中: L ——人工土厚度(cm), 本系统采用 100 cm ;
 Kt ——某温度时的渗滤速率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$);
 V ——平均孔径流速($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$);
 ρ ——土壤孔隙度, 本系统为 17.5% 。

反应速率常数可以反映人工土滤床中污染物质降解的快慢程度, 但是温度对生化反应速率的影响很大。根据人工土快滤处理系统中试工程实测数据代入式(2)中, 可以计算出不同温度条件下人工土快滤床

的反应速率常数(见表 6)。

表 6 不同温度条件下人工土滤床 BOD₅ 的反应速率常数
Table 6 Constant factor of BOD₅ reaction rate in the artificial soil biofilter at different temperature

温度 $T/^\circ\text{C}$	进水浓度 $C_0/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	出水浓度 $C_t/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	渗滤速率 $/\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$	反应时间 t/min	反应速率常数 k/min^{-1}
6	81.67	4.99	0.338	51.62	0.0542
10	74.48	3.53	0.428	40.77	0.0748
14	107.3	4.63	0.375	43.19	0.0728
20	65.09	1.58	0.537	32.49	0.1145

根据表 6 中温度 (T) 与反应速率常数 (k) 和反应时间 (t) 之间的相关统计回归, 分别得出反应速率常数与温度相关方程式(4)和反应时间与温度的相关方程式(5)。

$$k = 0.0289 + 4.0061 \times 10^{-3} \times T \quad r = 0.943$$

(4)

$$t = 57.1 - 1.21 \times T \quad r = -0.915$$

(5)

根据(4)式和(5)式计算出各温度下的反应速率常数 k 、相应的停留时间 t 及规定的出水水质标准 ($C_t = 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 代入式(2)可求出各温度下的 C_0 , 再乘风险系数 0.75 , 即为 BOD₅ 的进水浓度要求。从表 7 中可知, 人工土滤床具有较强的耗氧处理能力和耐 BOD₅ 负荷冲击能力, 可用于处理城市污水和中低浓度的工业废水。

表 7 人工土生物滤床的进水 BOD₅ 浓度要求

Table 7 The requirement of influent BOD₅ concentration for the artificial soil biofilter

温度 $T/^\circ\text{C}$	反应时间 t/min	反应速率常数 k/min^{-1}	进水浓度上限 BOD ₅ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
5	51	0.0489	182
10	45	0.0690	335
15	39	0.0890	482
20	33	0.1090	548
25	27	0.1291	489
30	21	0.1491	344

2.2.2 处理系统对进水 BOD₅ 浓度的要求

根据不同温度人工土滤床的进水 BOD₅ 浓度上限以及不同季节前处理部分对 BOD₅ 的去除率, 可计算出处理系统进水 BOD₅ 浓度上限(见表 8)。但中试工程实际进水中 BOD₅ 浓度低于此值, 其人工土滤床处理出水 BOD₅ 的年平均浓度仅为 $3.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [3]。

2.3 对进水 COD 浓度的要求

2.3.1 人工土快滤床对进水 COD 浓度的要求

根据一系列不同 COD 浓度梯度的污水渗滤试验测得的进、出水 COD 值和渗滤速率 Kt 值, 并将 Kt 值换算为 10°C 条件下的渗滤速率—— K_{10} , 再进行统计

表 8 人工土快滤处理系统允许的进水 BOD₅ 浓度

Table 8 Permissive influent BOD₅ concentration of the artificial soil rapid infiltration treatment system

季节	原污水 /mg · L ⁻¹	前处理出水 /mg · L ⁻¹	前处理去除 率/%	滤床进水上 限/mg · L ⁻¹	系统进水上 限/mg · L ⁻¹
春	121	89.8	25.8	335	451
夏	85.0	53.6	36.9	344	545
秋	94.8	78.9	16.8	482	578
冬	119	84.9	28.6	182	255

计算,得到进水 COD 与 K_{10} 的相关方程式 (6),二者达到极显著负指数相关关系。

$$K_{10}=a \cdot e^{-b \cdot COD}$$

(6)

其中: $a=1.320$, $b=-0.005$, $r=-0.9932$

根据中试运行结果,人工土滤床的渗滤速率 K_{10} 维持在 $0.3\text{—}0.5\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$,出水达标率为 87.3%,而且水力负荷较高。因此将 K_{10} 值代入式(6)中,求得人工土滤床最适的进水 COD 浓度范围为 $200\text{—}300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.3.2 处理系统对进水 COD 浓度的要求

根据滤床对进水 COD 浓度要求和中试工程前处理对 COD 的去除率,可以计算出处理系统进水 COD 的最适水质浓度范围(见表 9)为 $400\text{—}700\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。

3 结论

(1) 为了防止人工土滤床被悬浮物 SS 堵塞问题的出现,要求进入滤床污水的 SS 浓度为 $60\text{—}80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;由引水渠、调节沉淀池和升流式污泥水解池组成的中试工程前处理设施对 SS 去除率达到 75% 左右,

(上接第 207 页)

[3] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 138 – 230.

[4] 王红兵,等. 上海淀山湖、黄浦江水系浮游藻类及藻类毒素的动态研究[J]. 环境与健康杂志, 1995, 12(5): 196 – 199.

[5] M Liu, P J Baugh, S M Hutchinson, et al Historical record and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in core sediments from the Yangtze Estuary, China[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 110: 357 – 365.

[6] 戴维明,顾友直. 上海西、南区排污口沉积物中重金属元素累积行为分析[J]. 上海环境科学, 1990, 9(7): 38 – 40.

[7] 黄沈发,陈长虹,贺军峰. 黄浦江上游汇水区畜禽业污染及其防止对策[J]. 上海环境科学, 1994, 13(5): 4 – 8.

[8] Viatcheslav Dushenkov, et al. Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams[J]. *Environ Sci & Technol*, 1995, 29(5): 1 239 – 1 245.

[9] 戴全裕,陆源高,魏 云,等. 水培经济植物对酿酒废水净化与资

表 9 人工土快滤处理系统的进水 COD 浓度要求

Table 9 The requirement of influent COD concentration for the artificial soil rapid infiltration treatment system

季节	水力负荷率 /m	原污水 /mg · L ⁻¹	升流池出水 /mg · L ⁻¹	前处理去 除率/%	系统进水要求 /mg · L ⁻¹
春	51.8	435	188	56.8	463—694
夏	69.9	381	133	65.1	573—860
秋	47.1	345	182	47.2	379—568
冬	38.9	459	209	54.5	440—659
平均	208	405	178	56.0	455—682

整个处理系统进水 SS 浓度要求在 $220\text{—}390\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。

(2) 人工土滤床的 BOD₅ 降解过程符合一级反应动力学规律,并具有较强的耗氧(BOD₅)处理能力,冬季对进水 BOD₅ 浓度要求在 $180\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下;中试工程前处理设施对 BOD₅ 的去除率在 20%—35% 之间,整个处理系统进水 BOD₅ 浓度要求在 $250\text{—}500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。

(3) 人工土滤床最适的进水 COD 浓度范围为 $200\text{—}300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。中试工程前处理设施对 COD 的年平均去除率为 56%,整个处理系统进水 COD 浓度要求在 $400\text{—}700\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。

参考文献:

[1] 张祖锡,白 瑛,李金玲,等. 城市污水人工土快滤处理技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. 24 – 58.

[2] 李国学,等. 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. 81 – 89.

[3] 崔理华,等. 北京西郊城市污水人工快滤处理与利用系统[J]. 中国环境科学, 2000, 20(1): 45 – 48.

源化生态工程研究[J]. 科学通报, 1996, 41(6): 547 – 551.

[10] 宋祥甫, 邹国燕, 吴伟明, 等. 浮床水稻对富营养化水体中氮、磷的去除效果及规律研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(5): 489 – 494.

[11] 丁树荣. 高产水生微管束植物在城镇污水资源化中的作用及其发展前景[J]. 中国环境科学, 1984, 4(2): 10 – 15.

[12] 孙子浩,俞子文,余叔文. 城市富营养化水域的生物治理和凤眼莲抑制藻类生长的机理[J]. 环境科学学报, 1989, 9(2): 188 – 195.

[13] 王国祥,濮培民. 若干人工调控措施对富营养化湖泊藻类种群的影响[J]. 环境科学, 1999, 20(2): 71 – 74.

[14] 成水平. 人工湿地废水处理系统的生物学基础研究进展[J]. 湖泊科学, 1996, 8(3): 268 – 272.

[15] Hans P L Willerns, et al. Nitrate removal in riparian wetland soils: effects of flow rate, temperature, nitrate concentrate and soils depth[J]. *Water Research*, 1997, 31(4): 841 – 849.