

慢速渗滤土地处理系统对沈阳西部城市污水有机污染物净化效果的研究*

张丽珊 于殿臣 刘海玲 姚家彪 朱 岩 尹昭华 姜 萍 可 夫

中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110015)

【摘要】 本文研究了慢速渗滤土地处理系统对沈阳西部城市污水中有机污染物的净化效果和有机污染物在土地处理系统土壤中的残留情况。结果表明, 在试验条件下, 系统对有机污染物具有良好的净化效果, 大多数有机污染物在系统输出水中未被检出, 少数重点有机污染物在系统输出水中的浓度也明显降低, 其中苯、氯苯、1,2-和1,4-二氯苯、苯酚、邻苯二甲酸二丁酯、 γ -666等的含量已明显低于地面水水质标准建议值。系统对绝大多数重点有机污染物的去除率达95—100%, 而不同重点有机污染物在土壤中的残留率为0—3%。

关键词 土地处理系统 有机污染物 净化效果

Purification effect of slow rate land treatment system on organic pollutants in municipal wastewater from west Shenyang. Zhang Lishan, Yu Dianchen, Liu Hailing, Yao Jiabiao, Zhu Yan, Yin Zhaochua, Jiang Ping and Ke Fu (Institute of Applied Ecology, Academia Sinica, Shenyang 110015). -Chin. J. Appl. Ecol., 1992, 3(4): 355—363.

The purification effect of slow rate land treatment system (SR-LTS) on organic pollutants in wastewater and the residual rate of organic pollutants in soil are studied in this paper. It's shown that the system has a good purifying effect on organic pollutants, most of the organic pollutants in wastewater being not detected in effluent and some priority organic pollutants in it being significantly decreased, among which, the concentrations of benzene, chlorobenzene, 1,2-dichlorobenzene and 1,4-dichlorobenzene, phenol, dibutyl-phthalate and γ -666 are much lower than the recommended quality standard of surface water. The removal efficiency for most priority organic pollutants is 95—100%, and their residual rate in soil is 0—3%.

Key words Land treatment system, Organic pollutant, Purification effect.

1 引言

沈阳地区水资源短缺, 而城市污水的日排放量高达 40×10^4 t, 因此将处理过的城市及工业废水重新利用具有重要意义。污水土地处理系统技术为城市污水的资源化开发提供一条经

济有效的途径。我国应用污水土地处理系统的试验研究工作已经进行多年, 对于城市污水土地处理系统净化功能的评价大都采用BOD、COD、TOC等综合指标^[1], 但由于城市污水中未经处理的工业污水所占比重较大, 工业污水中存在一些毒性较大的有机污染物, 其浓度虽然并不高, 一般在ppm至ppb数量级水平, 但是在生态毒理方面具有不可忽视的意义, 因此采用有机物综合指标评价污水水质时常不可能准确地反映净化水的质量。本工作重点研究土

* 本文系“七五”国家科技攻关项目“沈阳西部城市污水慢速渗滤土地处理系统研究”内容之一, 在高拯民先生指导下进行。

本文于1992年4月15日收到, 5月16日改回。

地处理系统对各种有机污染物的净化功能,为系统的工程设计、运行管理和制定对重点有机污染物的调控对策提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 试验地点与污水土地处理系统(LTS)的工程结构。

本试验场地位于沈阳市洪区扬士乡余良村。沈阳市西部污水从张士灌渠通过明渠流经7.5km到达这里。整个试验系统由主系统(种植水稻区)、调节系统(种植垂柳、紫穗槐、能源高粱区)和辅助系统(设沉淀池、稳定塘、排水沟等)3部分组成,平面布局如图1所示。张士灌渠的污水经灌渠进入试验区的沉淀池、稳定塘进行预处理后,由水泵提水输入各试验区,经土壤-植物系统处理后,通过侧渗沟和排水沟等排入养鱼池,最后排出试验区。

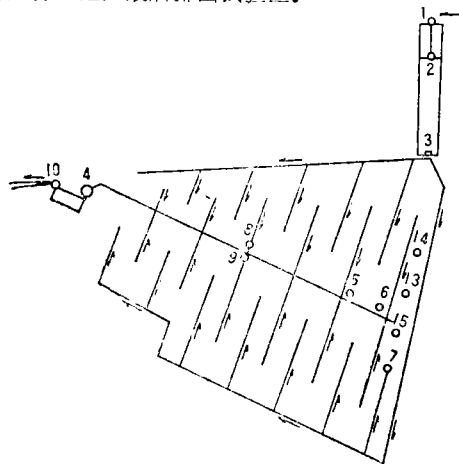


图1 沈阳西部城市污水SR-LTS试验地结构示意图及水质采样点分布图

Fig.1 Diagram of structure and sampling locations of SR-LTS for wastewater from west Shenyang.

1. 沉淀池进水 Influent in sedimentation pool, 2. 沉淀池出水 Effluent in sedimentation pool, 3. 稳定池出水 Effluent stabilization pool, 4. 鱼池进水 Influent in fish pond, 5, 6. 暗管排水 Drainage in underground pipe, 7. 林地侧渗水 Side-seepage water in forest land, 8, 9. 侧渗沟出水 Effluent in side-seeping sewer, 10. 鱼池出水 Effluent in fish pond, 13. 紫穗槐出水 Effluent in amorphous forest land, 14. 高粱出水 Effluent in sorghum field, 15. 林稻串出水 Effluent in forest land-rice field.

试验区面积约7ha, 土壤为草甸棕壤。日处理污水量为600t, 系统的水力负荷为20550m³/年。

2.2 样品采集

2.2.1 水样采集 选择试验场地的沉淀池入口(1号)、稳定塘出口(3号)、侧渗沟(8号)和养鱼池出口(10号)为4个主要采水样点, 位置如图1所示。定期采集水样, 采样时间分别为1987年3月、1988年6月和1989年6月。每次采用多点连续采样5次, 共采集水样30—60L。

2.2.2 土壤样采集 1989年5月、10月和1990年5月分别在试验场地的水稻田中采集土壤样品, 同时在邻近的清水灌区采集相同的土壤样品以供对照。

2.3 有机污染物的富集与提取 水中有机污染物采用大孔树脂富集, 经洗脱、萃取、干燥、浓缩后, 进行GC和GC/MS分析。土壤中的有机污染物采用CH₂Cl₂索氏提取方法, 提取液经干燥、浓缩后, 用GC和GC/MS进行分析。

2.4 有机污染物的鉴定与定量分析

有机污染物的鉴定采用GC/MS计算机谱库检索, 结合标准图进行鉴定, 少数化合物利用特征峰及保留时间确定。对于重点有机污染物采用特征峰检索, 计算机谱库检索和加标准化合物的方法鉴定, 以保证其准确性。

定量分析采用多重内标相对重量校正因子法同时对多种化合物进行定量测定。为了控制分析质量, 在土壤样品中加入 α -氯萘作为质量控制内标, 土壤中 α -氯萘的回收率为86%, 变异系数为11%。

3 结果与讨论

3.1 处理前污水中的有机污染物

在1987—1988年期间对处理前污水中的有机污染物成份进行监测, 结果见表1。

从表1可见, 未经处理的污水, 其中有机污染物的成份复杂, 有机污染物的数目随着工业污水排放的时间不同, 污水中有机污染物的成份变化较大。从污水中检出主要的有机污染物为脂肪烃、芳烃、卤代烃、酮、醛、醇、酚、含氮化合物、酸、酯和杂环化合物, 各类有机污染物的总数达61—182种, 属于重点有机污染物约有11—18种, 占检出有机污染物总数的6—26%。这些重点有机污染物如苯、甲苯、氯苯、乙苯、1,3-二氯苯, 1,4-二氯苯、

表 1 处理前污水中检出的各类有机污染物统计表

Tab.1 Organic pollutants detected in wastewater before treatment

有机污染物类型 Types of organic pollutant	采样时间 Sampling time				
	1987.3	1987.3	1987.8	1988.6	1988.6
	采样地点 Sampling site				
	渠首* Head of cannel	甘官桥* Gan guan bridge	LTS进水口 Inlet of LTS	LTS进水口 Inlet of LTS	沉淀池出口 Outlet of sediment- ation pool
脂肪烃类 Hydrocarbon compounds	5	27	2	15	13
芳烃类 PAH's	19	12	9	32	24
醛、酮、醇、酚类 Aldehyde, keton, alcohol and phenol compounds	34	66	17	14	19
卤代烃类 Halo-hydrocarbon compounds	4	8	—	9	12
含氮化合物类 N-compounds	11	10	4	3	9
杂环化合物类 Heterocycle compounds	13	26	3	6	15
酸酯类 Acid and ester compounds	30	33	26	7	7
检出的化合物总数 Sum of compounds	116	182	61	86	99
重点有机污染物总数 Sum of priority organic pollutants	15	11	16	18	18

* 引自南京大学环境科学系“沈阳市细河水中主要有机毒物的筛选”。

1,2,4-三氯苯、硝基苯、萘、蒽、蒽烯、茛、蒽、菲、茱萸、 γ -666、 δ -666、邻苯二甲酸酯等均为世界许多国家公认的,并被我国列为优先控制的环境有机污染物。虽然它们的浓度一般在ppb或ppt数量级水平,但其含量均超过地表水允许浓度或高于其它排污河的含量。而且它们在污水中的检出率较高,检出率为100%有4种,83%3种,67%5种,50%9种,33%3种,17%3种(表2)。以上结果表明,未经处理的污水难降解有毒有机物的污染较严重。由于这些有机污染物的难降解性、“三致”效应和检出率高,在应用污水处理技术时对其归宿与净化效果应予以足够的重视^[2]。

3.2 LTS对污水中有机污染物的净化效果

3.2.1 LTS输出水中的有机污染物 经两年(1988和1989年)对LTS输出水中有机污染物数量和含量进行监测,结果表明(表3),沈阳西部城市污水经过LTS处理后,输出水中检出的有机污染物总数大幅度减少,各类有机污染物在输出水中检出的数目也明显减少,其减少程度因化合物不同而异,其中以脂肪烃、醛、酮、醇、

酚、含氮化合物减少最为明显,而芳烃、卤代烃等难降解有机污染物的数量也有不同程度的下降。试验结果表明,大约有一半有机污染物通过处理后在系统的输出水中未被检出。对于一些重点有机污染物,虽然它们在输出水中检出的减少幅度不大,但它们在输出水中的含量却明显降低,有些重点有机污染物的含量可降低1—2个数量级,或甚至在输出水中未被检出。其中有些重点有机污染物如苯、氯苯、1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、苯酚、 γ -666和邻苯二甲酸二丁酯等的含量已大大低于饮用水水质建议值标准。另外一些如蒽烯、蒽、茱萸、茱、硝基苯和苯并(a)茱的含量与当地居民饮用水的含量相同(表4)。

3.2.2 LTS土壤中的有机污染物 应用LTS技术处理城市污水,有机污染物特别是重点有机污染物是否在土壤中残留是众所关注的问题,为此我们在连续试验3年后,于1989年在试验区内多点采集土壤样品进行有机污染物的分析,同时在清灌区胡台采集样品供比较,结果见表5。

从土壤中检出有机污染物的统计结果可以

表 2 污水中检出重点有机污染物及其含量

Tab.2 Contents of priority organic pollutants detected in wastewater

有机污染物 Organic pollutants	采样时间 Sampling time						检出率 Frequency detected (%)	检出浓度范围 Concentration range detected (µg/L)
	1987.3	1987.3	1987.8	1988.6	1988.6	1989.6		
	采样地点 Sampling site							
	*渠首 Head of cannel	*甘官桥 Gan guan bridge	稳定塘 Outlet of stabiliza- tion pool	沉淀池 Inlet of sediment- ation pool	稳定塘 Outlet of stabiliza- tion pool	稳定塘 Outlet of stabiliza- tion pool		
苯 Benzene				+	+	+	50	0.79—2.13
甲苯 Toluene		+		+	+	+	67	0.80—1.56
氯苯 Chlorobenzene		+		+	+	+	67	1.69—2.91
乙苯 Ethylbenzene		+		+	+	+	67	0.20—1.00
1,3-二氯苯 1,3-dichlorobenzene				+	+	+	50	痕量 Trace—0.43
1,4-二氯苯 1,4-dichlorobenzene				+	+	+	50	0.35—0.63
1,2,4-三氯苯 1,2,4-trichlorobenzene	+	+		+	+	+	83	0.85—8.24
萘 Naphthlene	+	+	+	+	+	+	100	1.94—18.26
萘烯 Acenaphthylene	+	+	+	+	+	+	100	ND—2.01
萘 Acenaphthene	+		+	+	+	+	67	1.98—6.38
邻苯二甲酸二乙酯 Diethyl phthalate	+	+	+				50	
芴 Fluorene	+		+	+	+	+	83	2.10—2.48
菲 Phenanthrene	+		+	+	+	+	83	1.89—4.15
蒽 Anthracene				+	+	+	50	0.74—2.46
邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	+	+	+	+	+	+	100	9.2—59.44
荧蒽 Fluoranthene				+	+	+	50	0.79—2.60
芘 Pyrene	+			+	+	+	50	0.30—0.94
邻苯二甲酸二异辛酯 Bis(2-ethylhexyl) phthalate	+	+	+	+	+	+	100	1.11—3.87
硝基苯 Nitrobenzene			+	+	+	+	67	1.41—3.41
苯酚 Phenol	+	+				+	50	—2.56
2,4-二甲酚 2,4-dimethyl phenol						+	17	
α-666	+	+				+	50	
β-666	+					+	33	
γ-666	+					+	33	3.36
δ-666	+					+	33	4.53
苯并(k)荧蒽 Benzo(k)fluoranthene						+	17	1.36
苯并(a)芘 Benzo(a)pyrene						+	17	0.89

* 同表 1。

呷出, 在 LTS 试验地土壤中检出的有机污染物, 无论是有机污染物的总数或是各类有机污染物的总数均明显高于清灌区土壤, 但其中重点有机污染物的总数却未见明显差异, 说明污水通过 LTS 处理, 其中大多数的有机污染物被土壤所截留并被降解, 但仍有部分难降解的重点有机污染物残留在土壤中。土壤中各类重点有机污染物的残留量不尽相同 (表 6), 如芳

烃、邻苯二甲酸酯和 666 等类的残留量较高, 除邻苯二甲酸二丁酯外 ($>2\text{mg/kg}$), 一般 $<1\text{mg/kg}$, 而一些易挥发的重点有机污染物如硝基苯、苯、甲苯、乙苯和一些卤代烃如 1,3-二氯苯、1,4-二氯苯、1,2,4-三氯苯等的残留量则 $<0.1\text{mg/kg}$ 。虽然它们的残留量并不高, 但由于其难降解性, 故对其在环境中的累积、去向和生态效应必须进行长期观察研

表 3 LTS主要输出水中检出各类有机污染物统计表

Tab.3 Organic pollutants in effluent of LTS

有机污染物类型 Types of organic pollutant	采样时间 Sampling time		采样地点 Sampling site		
	1988.6		1989.6		
	稳定池出口 Outlet of stabiliza- tion pool	侧渗沟 Side-see- ping sewer	养鱼池出口 Outlet of fish pond	稳定池出口 Outlet of stabiliza- tion pool	养鱼池出口 Outlet of fish pond
脂肪烃类 Hydrocarbon compounds	12	8	1	6	8
芳烃类 PAH'S	29	13	12	25	21
卤代烃类 Halo-hydrocarbon compounds	7	10	6	3	3
酮、醛、醇、酚类 Aldehyde, keton, alchcohol, and phenol compounds	20	12	1	18	11
含氮化合物类 N-compounds	11	2	1	10	3
酸酯类 Acid and ester compounds	6	6	4	9	5
杂环化合物类 Heterocycle compounds	14	7	9	8	5
有机污染物总数 Sum of compounds	99	58	34	79	56
重点有机污染物总数 Sum of priority organic pollutants	18	14	10	25	20

表 4 LTS输出水中重点有机污染物的含量 (µg/L)

Tab.4 Content of priority organic pollutants in effluent of LTS

有机污染物 Organic pollutants	采样时间 Sampling time		采样地点 Sampling site	
	1988.6		1989.6	
	侧渗沟 Side-seeping sewer	养鱼池出口 Outlet of fish pond	养鱼池出口 Outlet of fish pond	养鱼池出口 Outlet of fish pond
苯 Benzene	ND	1.18*		0.87*
甲苯 Toluene	0.14	ND		0.038
氯苯 Chlorobenzene	ND	ND		ND
乙苯 Ethylbenzene	ND	ND		0.022
1,3-二氯苯 1,3-dichlorobenzene	ND	ND		ND
1,4-二氯苯 1,4-dichlorobenzene	ND	ND		0.052*
1,2-二氯苯 1,2-dichlorobenzene	ND	ND		0.032*
1,2,4-三氯苯 1,2,4-trichlorobenzene	0.15	ND		0.26
萘 Naphthlene	0.80	0.19**		0.48
萘烯 Acenaphthylene	0.31	ND		0.040
萘 Acenaphthene	0.34	0.37		0.081
邻苯二甲酸二乙酯 Diethyl phthalate	0.80	0.68		ND
芴 Fluorene	1.58	1.47		0.37
菲 Phenanthrene	1.61	1.51		0.76
蒽 Anthracene	0.57	0.76		0.22
邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	9.72*	8.67*		0.68*
荧蒽 Fluoranthene	0.89	ND		0.12*
芘 Pyrene	0.48	0.75		0.086**
邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯 Bis(2-ethylhexyl)phthalate	0.68	0.39		0.54
硝基苯 Nitrobenzene	0.19	0.56**		1.72
苯酚 Phenol				ND
2,4-二甲酚 2,4-dimethyl phenol				ND
γ-666				0.47*
δ-666				ND
苯并(k)荧蒽 Benzo(k)fluoranthene				0.077
苯并(a)芘 Benzo(a)pyrene				0.041**

* <WHO饮用水水质标准 <WHO'S water quality criteria for potable water, ** 与当地饮用水含量相同 Same as the content of local drinking water, ND—未检出 Not detected.

表 5 LTS土壤和清灌区土壤中检出的各类有机污染物统计表(1989年10月)(单位: 种数)

Tab.5 Organic pollutants detected in LTS soil and clean water irrigated soil (1989.10)

采样地点 Sampling site	清灌区 Clean water irrigated	LTS
脂肪烃类 Hydrocarbon compounds	6	12
卤代烃类 Halo-hydrocarbon compounds	2	6
芳烃类 PAH's	15	30
醛、酮、醇、酚类 Aldehyde, keton, alchcohol, phenol compounds	15	20
含氮化合物类 N-compounds	—	2
杂环化合物类 Heterocycle compounds	6	4
酸酯类 Acid, ester compounds	4	7
检出有机污染物总数 Sum of compounds	48	81
重点有机污染物总数 Sum of priority organic pollutants	19	22

表 6 清灌区与LTS土壤中重点有机污染物含量(mg/kg)

Tab.6 Content of priority organic pollutants in soil of LTS and clean water irrigated

有机污染物 Organic pollutants	采样时间 Sampling time					
	1989.5	1989.10	1990.5	1989.5	1989.10	1990.5
	采样地点 Sampling site			清灌区 Clean water irrigated		
	LTS					
苯 Benzene	0.17	0.09	0.064	0.22	0.042	0.006
甲苯 Toluene	ND	ND	0.026	ND	0.009	ND
氯苯 Chlorobenzene	ND	痕量	ND	ND	ND	ND
乙苯 Ethylbenzene	ND	痕量	痕量	ND	0.008	ND
苯酚 Phenol	痕量 ^{a)}	ND	ND	ND	0.037	ND
1,3-二氯苯 1,3-dichlorobenzene	ND	0.010	ND	ND	ND	ND
1,4-二氯苯 1,4-dichlorobenzene	ND	0.012	0.022	ND	ND	ND
硝基苯 Nitrobenzene	ND	ND	0.085	ND	ND	ND
1,2,4-三氯苯 1,2,4-trichlorobenzene	痕量	0.031	0.052	ND	ND	ND
萘 Naphthlene	0.049	0.045	0.030	0.080	0.014	0.006
苊烯 Acenaphthylene	ND	0.026	0.011	ND	0.022	ND
苊 Acenaphthene	0.009	0.025	0.055	ND	0.043	0.014
芘 Fluorene	0.047	0.049	0.029	ND	0.022	0.013
γ-666	—	0.14	0.117	—	0.11	0.058
菲 Phenanthrene	0.170	0.21	0.222	ND	0.015	0.113
蒽 Anthracene	0.034	0.070	0.177	ND	ND	0.072
δ-666	—	0.76	0.411	—	0.45	0.068
邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	0.19	2.03	2.124	1.26	6.37	1.662
荧蒽 Fluoranthene	0.18	0.62	0.379	ND	0.13	ND
芘 Pyrene	0.23	0.85	0.154	ND	0.14	ND
苯并(a)蒽 Benzo(a)anthrene	0.50	0.77	0.230	0.35	0.25	ND
蒽 Chrysene	0.26	0.82	>0.366	0.17	0.11	>0.321
邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯 Bis(2-ethylhexyl)phthalate	0.16	0.30	0.59	0.80		
苯并(k)荧蒽 Benzo(k)fluoranthene	0.040	0.15	0.138	ND	0.070	0.016
苯并(a)芘 Benzo(a)pyrene	0.088	0.16	0.033	ND	痕量	0.042

ND—未检出 Not detected, a) Trace

究。

实验结果表明, 土壤对重点有机污染物具有较强的净化能力。从表 6 可见, 1989年10月土壤中大多数重点有机污染物的含量经半年时间(至1990年5月)均有不同程度减少, 一般减少约20—60%。

必须指出, 在清灌区土壤中也检出多种重点有机污染物, 这些有机物或者是土壤中的天然生成物, 或者是大气降尘和人为活动等引入, 因此在研究系统的净化功能时应考虑这方面的因素^[3]。

3.3 LTS对污水中有机污染物的净化功能

3.3.1 LTS对有机污染物净化能力的估算 综合比较1988和1989两年期间LTS输入水、输出水和土壤中重点有机污染物的分析结果, 估算系统对重点有机污染物的净化率和重点有机污染物在土壤中降解率与残留率, 对LTS净化重点有机污染物的能力作了粗略估价。

为了计算方便, 估算是基于下列假定条件下进行的: (1) 实验期间输入水、输出水中的重点有机污染物的浓度是稳定的; (2) 系统中有机污染物的降解包括生物降解和物理化学降解(如挥发、光解和水解过程); 因此, 在计算重点有机污染物在土地处理系统中的降解率时, 实际上包括它们在渠道运行过程中的降解率。

估算方法如下:

系统中输入水(或输出水)中重点有机污染物量(kg/ha) = 输入水(或输出水)中重点有机污染物浓度($\mu\text{g/L}$) \times 年输入水量(或输出水量) $\times 10^{-6} \div 7$

土壤中重点有机污染物的残留量(kg/ha) = 土壤中重点有机污染物含量(mg/kg) $\times 2.7$

其中每公顷土壤的重量为 $2.7 \times 10^5 \text{ kg/ha}$ (按土壤的容重为 1.35 g/cm^3 , 以耕层20cm计算)。

系统去除重点有机污染物量(kg/ha) = 输入水中重点有机污染物量(kg/ha) - 输出水中重点有机污染物量(kg/ha)

去除率(%) =

$$\frac{\text{系统去除重点有机污染物量(kg/ha)}}{\text{输入水中重点有机污染物量(kg/ha)}} \times 100\%$$

土壤中重点有机污染物的年降解率(%) =

$$\left(1 - \frac{\text{土壤中重点有机污染物残留量(kg/ha)}}{\text{系统去除重点有机污染物量(kg/ha)}}\right) \times 100\%$$

2年土壤中重点有机污染物的残留率 =

$$(\text{1990年春土壤中重点有机污染物残留量(kg/ha)} \div \text{2年输入水中重点有机污染物量(kg/ha)}) \times 100\%$$

3.3.2 LTS对重点有机污染物的净化功能 比较1988和1989两年期间LTS输入水、输出水和土壤中重点有机物的分析结果(表7), 可以看出LTS对输入水带进系统的重点有机污染物具有较高的净化能力。1988年从输入水中带进系统各种重点有机污染物有18种, 输入数量较高的如邻苯二甲酸二丁酯为 873 kg/ha , 大部分为 $1.5\text{—}30 \text{ kg/ha}$ 。经系统处理后约有半数重点有机污染物在系统输出水中未被检出(8种未被检出), 其余的检出量在 $0.8\text{—}15 \text{ kg/ha}$ 。重点有机污染物在土壤中的残留量也较低, 几乎有50%重点有机污染物在土壤中未见残留, 其它的残留量在 $<0.15\text{—}0.6 \text{ kg/ha}$, 系统对不同重点有机污染物的去除率在60—100%, 个别的为30—40%。重点有机污染物在土壤中的降解率较高, 均在95—100%。必须说明, 土壤中重点有机污染物的降解过程包括生物降解和非生物降解过程, 不同重点有机污染物因其理化性质不同其主要降解过程亦不相同, 这里未予以区分。

1989年由输入水带入系统的各种重点有机污染物的数量较1988年相对高些, 一般在 $3.15\text{—}64 \text{ kg/ha}$, 个别达 $90\text{—}140 \text{ kg/ha}$, 但在输出水中检出的各种重点有机污染物的量并不高于1988年, 一般在 $0.15\text{—}1.5 \text{ kg/ha}$, 同时它们在土壤中的残留量并不多, 一般为 0.15—

表 7 LTS对沈阳西部城市污水中重点有机污染物的净化效果

Tab.7 Purifying effect of LTS for priority organic pollutants in municipal wastewater from west Shenyang

有机污染物 Organic pollutants	输入水中有机污染物 Organic pollutants in influent (kg/ha)	输出水中有机污染物 Organic pollutants in effluent (kg/ha)	土壤中残留有机污染物 Organic pollutants remained in soil (kg/ha)	有机污染物去除率 Removal efficiency of organic pollutants (%)	土壤降解率 Annual degradation rate in soil (%)	2年系统截留有机污染物总量 Quantities of organic pollutants intercepted by LTS in two years (kg/ha)	2年土壤中有机污染物的残留率 Residual rate of organic pollutants in soil during two years (%)
苯 Benzene	20.9 ^{a)} (12.3) ^{b)}	11.7 (4.5)	0.45 (0.15)	44 (63)	95 (98)	17	0.8
甲苯 Toluene	11.7 (14.0)	ND (0.15)	ND (<0.15)	100 (99)	100 (99)	26.7	0.3
氯苯 Chlorobenzene	24.8 (ND)	ND (ND)	ND (ND)	100 (—)	100 (—)	24.8	0
乙苯 Ethylbenzene	7.05 (3.15)	ND (0.15)	ND (ND)	100 (97)	100 (100)	10.1	0
1,3-二氯苯 1,3-dichlorobenzene	1.5 (痕量 Trace)	ND (ND)	ND (ND)	100 (—)	100 (—)	1.5	0
1,4-二氯苯 1,4-dichlorobenzene	9.3 (6.6)	ND (0.3)	ND (<0.15)	100 (96)	100 (99)	15.6	0.4
1,2,4-三氯苯 1,2,4-trichlorobenzene	12.5 (128)	ND (1.35)	ND (0.15)	100 (99)	100 (99)	139	0.1
萘 Naphthlene	28.5 (284)	0.8 (2.55)	<0.15 (<0.15)	97 (99)	99 (99)	293	<0.1
萘烯 Acenaphylene	14.4 (31.2)	ND (0.15)	ND (<0.15)	100 (99)	100 (99)	45.5	<0.1
萘 Acenaphthene	34.4 (98.9)	3.6 (0.45)	<0.15 (0.15)	90 (99)	99 (99)	129	0.1
芴 Fluorene	36.5 (38.3)	14.4 (1.95)	<0.15 (<0.15)	60 (95)	99 (99)	64.8	0.1
菲 Phenanthrene	27.8 (64.4)	15.0 (3.9)	0.45 (0.6)	46 (94)	96 (99)	73.2	0.7
蒽 Anthracene	10.8 (38.1)	7.5 (1.2)	<0.15 (0.45)	31 (97)	95 (99)	40.2	1.1
邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	873 (143)	85.5 (3.6)	0.45 (5.7)	90 (97)	99 (96)	776	0.7
荧蒽 Fluoranthene	11.6 (40.4)	ND (0.6)	0.45 (1.05)	100 (98)	96 (97)	51.3	2
芘 Pyrene	4.35 (12)	7.5 (0.45)	0.60 (0.45)	— (96)	— (96)	8.4	3.4
邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯 Bis(2-ethylhexyl)phthalate	16.5 (60)	3.9 (2.85)	0.45 (1.05)	76 (95)	96 (98)	69.8	1.4
硝基苯 Nitrobenzene	20.7 (52.8)	5.4 (9)	ND (0.3)	74 (83)	100 (99)	59.1	0.4
苯酚 Phenol	— (39.8)	— (ND)	ND (ND)	— (100)	— (100)	39.8	0
2,4-二甲酚 2,4-dimethyl phenol	— (51.5)	— (ND)	ND (1.35)	— (100)	— (97)	51.5	2.6
γ -666	— (70.2)	— (2.4)	ND (0.3)	— (97)	— (99)	67.8	0.5
δ -666	— (31.8)	— (ND)	ND (1.05)	— (100)	— (97)	31.8	3.5
苯并(k)荧蒽 Benzo(k)fluoranthene	— (21.2)	— (0.45)	<0.15 (0.3)	— (98)	— (98)	20.7	1.8
苯并(a)芘 Benzo(a)pyrene	— (13.8)	— (0.30)	0.30 (<0.15)	— (98)	— (99)	13.7	0.7

注Note: ND—未检出 Not detected, a) 1988年数据 Data in 1988, b) 1989年数据 Data in 1989.

1kg/ha。系统对重点有机污染物的去除率除个别为63%外,其余均在83—100%。各种重点有机污染物在土壤中的降解率均达97—100%。2年实验结果表明,系统截留重点有机污染物总量较高,可达10—776kg/ha,而2年中各种重点有机污染物在土壤中的残留率只有0—3%,其中一些卤代脂肪烃和单环芳烃类的化合物在土壤中的残留率降低,为0—0.8%,芳烃类和酞酸酯类化合物的残留率则较高,为0.7—3%,此类化合物在土壤中残留率高,除与本身难降解性有关外,也与土壤本身存在天然有机物和大气降尘等有关^[4]。

以上结果表明,LTS对城市污水中有机污染物具有良好的净化效果,在本试验的水力负荷和运行管理措施条件下,大部分的重点有机污染物可通过系统去除并降解,但仍有少量难

降解的有机污染物残留在土壤中,因此应根据系统本身条件,包括土壤、地质、水文、干湿交替周期,以及系统的水力负荷与污染负荷等进行优化调整。

主要参考文献

- 1 高拯民主编。1986。土壤-植物系统污染生态研究。中国科学技术出版社,北京,124—141。
- 2 高拯民、李玉太。1990。城市污水土地处理系统中优先有机污染物的生态行为及其调控对策。应用生态学报,1(1):16—19。
- 3 Demlrijian, Y.A. et al. 1987. Fate of organic compounds in land application of contaminated municipal sludge. Journal WPCF, 59(1):32—38。
- 4 Wilson, J. T. et al. 1981. Transport and fate of selected organic pollutants in a sandy soil. J. Environ. Qual., 10(4):501—506。