城市污水自然生态处理与资源化利用技术

孙铁珩　李宪法　主编
宋玉芳　李培军　荆一凤　副主编

化学工业出版社
环境·能源出版中心
·北京·

需要全本请访问 www.ertongbook.com

（京）新登字 039 号

图书在版编目（CIP）数据

城市污水自然生态处理与资源化利用技术/孙铁珩，李宪法主编．—北京：化学工业出版社，2005.6
ISBN 7-5025-7431-X

Ⅰ.城… Ⅱ.①孙…②李… Ⅲ.①城市污水-污水处理②城市污水-废水综合利用 Ⅳ.X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 074673 号

城市污水自然生态处理与资源化利用技术

孙铁珩 李宪法 主编

宋玉芳 李培军 荆一凤 副主编

责任编辑：管德存 徐 娟

责任校对：王素芹

封面设计：胡艳玮

*

化学工业出版社
环境·能源出版中心 出版发行

（北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029）

购书咨询：(010)64982530
(010)64918013

购书传真：(010)64982630

http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 17¾ 字数 471 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7431-X

定 价：48.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

前　言

我国是世界上13个贫水国家之一，日趋严重的水污染进一步加剧了水资源短缺的矛盾。因地制宜地将污水自然处理与人工处理结合起来，实现污水资源化利用，是解决我国水资源短缺和水污染矛盾的最有效途径之一。污水土地处理系统（LTS）是将污水有控制地投配到土地上，通过土壤-植物-水系统中物理、化学和生物过程，使污染物得以净化，而营养物质和水得到再次利用的无害化与资源化处理技术。污水稳定塘系统由若干自然或人工挖掘的池塘组成，通过菌藻作用或菌藻、水生生物的综合作用而实现污水的净化，塘中生长的水生生物和净化后的水可以作为资源而重新得到利用。

本书以中国科学院沈阳应用生态研究所、中国环境科学研究院、北京市环境保护科学研究院、天津市环境保护科学研究院、华南环境科学研究所、广州市环境保护科学研究所、北京建筑工程学院等单位多年来在污水生态处理和资源化利用领域所取得的研究成果为基础，特别结合国家重点研究发展计划（2004 CB 418503）、国家自然科学基金重点项目（20337010）以及沈阳大学沈阳环境工程重点实验室基金等项目的科研进展，吸收近年来国际上污水生态处理与资源化利用的研究成果，并参考国内外有关污水生态处理与资源化利用专著编写而成。本书是对国内污水资源化生态工程研究的全面、系统的总结，有助于推动我国在该领域研究成果和技术的推广。

本书分上、下两篇，共18章。上篇为城市污水资源化土地处理技术，共9章。第1～3章介绍了我国污水处理的现状，污水资源化基本概念，阐述了污水资源化的基本内涵，土地处理的基本类型和工艺设计特征；第4、5章对污水土地处理系统中污染物的净化效率与生态效应进行详细论述；第6～8章为土地处理的效益分析与适宜性评价等方面内容；第9章为技术应用实例，包括各种类型实用规模土地处理系统的应用情况。上篇各章作者分别为：第1章，李秀颖、郑森林、孙铁珩；第2章，宋雪英、邢贵洋、宋玉芳；第3章，宋雪英、宋玉芳、孙铁珩；第4、5章，尹炜、李培军；第6章，郑森林、李秀颖、孙铁珩；第7、8章，张微、刘淼、宋玉芳；第9章，杨春璐、孙铁珩。

下篇为城市污水资源化处理的稳定塘技术，共9章。第1～4章介绍了稳定塘的工艺原理、类型、系统设计和国内外发展情况；第5、6章介绍了稳定塘的综合利用和计算机辅助设计；第7、8章介绍了一些新型的稳定塘技术及应用实例；第9章对稳定塘的运行管理做了简要说明。下篇各章作者分别为：第1章，

荆一凤；第 2 章，向连城；第 3 章，吴卓；第 4 章，李俊奇、吴俊奇；第 5 章，边嘉敏、胡必彬、江有才、金中；第 6 章，曹秀芹；第 7 章，汪慧贞；第 8 章，边嘉敏、金中、胡必彬；第 9 章，荆一凤。

除此之外，宋玉芳研究员还在本书的统稿、内容增删以及最后定稿等方面做了大量的工作，全书最后由孙铁珩、李宪法主编定稿。

从国外的污水生态处理的发展历史可见，城市污水资源化处理系统，因其经济的合理性及污水中营养资源的充分利用，已取得了很大发展，特别是在土地辽阔、环境容量大的国家，推广应用潜力很大。国外也有很多实用工程，例如瑞典的污水回灌回收工程，系统的维护和操作非常简便，投资省，处理效果好。加拿大、波兰、德国等许多国家也在积极研究和大力推行城市污水资源化处理与利用。国外的这些经验值得借鉴。未来的水资源概念应包括可利用的污（废）水资源。

我们殷切希望广大读者和有关专家对本书提出批评和进一步的改进意见，为促进污水生态处理和资源化利用技术在我国的推广和应用做出贡献。

编　者

2005 年 2 月

目　　录

上篇　城市污水资源化土地处理技术

1　总论 …… 1
1.1　我国水资源现状 …… 1
1.2　我国城市污水处理现状 …… 2
1.3　城市污水的无害化、资源化生态学处理 …… 3
1.4　城市规模与城市污水处理模式选择 …… 8
1.5　污水土地处理的发展与应用 …… 9
1.6　我国污水土地处理的潜力与发展战略 …… 12
1.7　国外污水土地处理的发展现状 …… 14
2　土地处理系统规划与设计 …… 16
2.1　土地处理系统概述及工艺性能 …… 16
2.2　土地处理系统的场地规划与调查 …… 20
2.3　场地规划程序 …… 28
2.4　土地处理系统的净化功能与同化容量 …… 36
2.5　污水土地处理分类与技术特征 …… 41
2.6　土地处理系统水质要求与预处理要求 …… 44
2.7　污水的再利用与排放 …… 47
3　土地处理系统的设计 …… 48
3.1　慢速渗滤土地处理系统 …… 48
3.2　快速渗滤土地处理系统 …… 53
3.3　地表漫流土地处理系统 …… 60
3.4　湿地土地处理系统 …… 64
3.5　地下渗滤土地处理系统 …… 70
3.6　联合土地处理系统 …… 74
4　污水土地处理系统中的污染物 …… 75
4.1　城市污水中的有机污染物 …… 75
4.2　有机污染物在土地处理系统中的迁移与归宿 …… 79
4.3　若干优先有机污染物的生态行为及其风险评价 …… 91
4.4　土地处理系统中重金属的土壤环境容量 …… 97
4.5　土壤中的重金属 …… 100
4.6　土地处理系统中重金属总量的控制 …… 106
4.7　重金属与土壤微生物生态活性 …… 107
4.8　土壤重金属的主要生物学指标和临界含量 …… 108

需要全本请访问 www.ertongbook.com

4.9 重金属复合污染效应 …… 110
5 污水土地处理系统的环境影响和生态效应 …… 115
5.1 土地处理的环境影响评价和控制对策 …… 115
5.2 土壤与水体环境效应 …… 115
5.3 农产品的生物学影响 …… 125
5.4 对人体健康的影响 …… 128
5.5 对地下水的影响 …… 128
5.6 地下水水质评价 …… 128
5.7 地下水背景调查及污染现状调查 …… 129
5.8 地下水水质影响评价数学模型 …… 132
5.9 模型验证及其对地下水影响的预测 …… 135
6 土地处理的效益分析 …… 138
6.1 土地处理的效益分析法 …… 138
6.2 土地处理的费用函数 …… 139
6.3 土地处理同常规处理的比较 …… 140
6.4 土地处理的社会与环境效益 …… 141
6.5 实地规模土地处理系统效益分析 …… 142
6.6 生态环境效益综合指标体系及长期安全运行 …… 143
7 城市污水土地处理适宜性评价系统 …… 155
7.1 适宜性评价原则 …… 155
7.2 土地处理系统评价体系的建立 …… 155
7.3 LTS 适宜性评价系统知识库设计 …… 157
7.4 LTS 适宜性评价系统推理及设计 …… 162
7.5 LTS 适宜性评价系统的“人-机”接口设计 …… 162
7.6 LTS 工艺参数的计算机辅助设计 …… 162
8 地理信息系统在土地处理系统中的应用 …… 166
8.1 地理信息系统概述 …… 166
8.2 地理信息系统的应用 …… 168
8.3 影响 LTS 应用的地域因素 …… 170
8.4 我国北方地区的地理特点及适宜性分析 …… 171
8.5 北方地区进行 LTS 研究的分区特征描述 …… 173
9 污水土地处理系统的应用实例 …… 176
9.1 天津城市污水湿地处理系统 …… 176
9.2 白泥坑人工湿地处理系统 …… 181
9.3 霍林河森林型慢速渗滤污水土地处理系统 …… 186
9.4 沈阳工业大学地下渗滤工程 …… 190
9.5 新疆阿图什城市污水土地处理工程 …… 193
参考文献 …… 198

下篇　城市污水资源化处理的稳定塘技术

1　绪论 …… 199
1.1　工艺原理 …… 199
1.2　稳定塘分类 …… 201
1.3　国内外发展概况 …… 201
2　稳定塘系统设计 …… 204
2.1　设计基础资料 …… 204
2.2　进出水水质标准 …… 205
2.3　塘系统及其优化 …… 205
2.4　预处理 …… 208
2.5　选址及总平面图 …… 210
2.6　高程设计及流程纵断面图 …… 212
2.7　技术经济分析 …… 213
3　各类稳定塘工艺设计 …… 216
3.1　厌氧塘 …… 216
3.2　兼性塘 …… 218
3.3　好氧塘 …… 221
3.4　曝气塘 …… 223
3.5　深度处理塘 …… 226
3.6　控制出水塘 …… 227
3.7　储留塘 …… 230
4　塘体及附属设施 …… 231
4.1　塘体设计 …… 231
4.2　防渗设计 …… 233
4.3　附属设施 …… 235
5　塘系统节能及综合利用 …… 237
5.1　风能曝气 …… 237
5.2　季节性间歇曝气 …… 238
5.3　综合生物塘 …… 239
5.4　水生植物利用 …… 241
6　稳定塘计算机辅助设计 …… 245
6.1　稳定塘计算机辅助设计概述及硬件 …… 245
6.2　稳定塘计算机辅助设计程序 …… 245
6.3　稳定塘计算机辅助设计工程制图 …… 247
6.4　稳定塘工程数据库 …… 248
6.5　稳定塘工程的人工智能 …… 249
6.6　稳定塘软件开发 …… 251
7　新型稳定塘实用技术 …… 253

7.1 新型曝气塘 …… 253
7.2 超深厌氧塘 …… 255
7.3 活性藻系统 …… 258
7.4 移动式曝气器曝气塘 …… 259
8 国内应用实例 …… 262
8.1 天津汉沽稳定塘 …… 262
8.2 深圳布吉稳定塘 …… 264
8.3 齐齐哈尔稳定塘 …… 266
8.4 鄂州鸭儿湖稳定塘 …… 267
9 稳定塘运行管理规程 …… 269
9.1 日常运行 …… 269
9.2 采样及水质测定 …… 270
9.3 季节性管理 …… 270
9.4 设施维护 …… 271
9.5 超负荷应急措施 …… 272
9.6 环境影响及对策 …… 273
9.7 安全生产与绿化 …… 273
参考文献 …… 275

上　篇
城市污水资源化土地处理技术

1 总　论

1.1 我国水资源现状

水是人类赖以生存和发展的基本条件，它对于人类文明和进步起至关重要的作用。随着世界人口的不断增长和工农业的迅速发展，人类对水资源的需求量日益增加。由于水资源利用与水量分布的不平衡，水资源的不合理开发及浪费，导致我国的水资源环境问题严重。

我国是一个水资源匮乏的国家，河川年径流总量为27115亿立方米，占世界总径流量的6.8%，居世界第3位。人均径流量不到3000m^3，仅为世界平均值的1/4。我国的水资源地区分布极不平衡，导致许多地区出现水资源短缺现象。东部地区（大兴安岭、阴山、贺兰山、乌鞘岭一线以东、以南，青藏高原以东地区）水资源比较丰富，而西北地区水资源严重不足。水资源南北分布差异也较大（见表1-1），北方地区水资源贫乏，虽然土地面积占全国的63.7%，耕地面积为全国的62.2%，而水资源总量却只占全国的20.11%，水资源短缺已成为制约经济发展的重要因素。

表1-1　我国南北方水土资源对比

流　域	水资源总量		耕地面积	
	/$\times10^8m^3$	/%	/亿亩①	/%
南方流域(4片)	21737	79.89	5.70	37.8
北方流域(6片)	5473	20.11	9.36	62.2
全国	27210	100	15.06	100

① 1亩=666.7m^2。

环境污染也是造成我国水资源紧张的另一个重要原因。目前，全国约有1/3的工业废水和大量的生活污水未经处理就直接排入江、河、湖、海，使水环境遭到严重的污染。许多河流已成了排污沟，许多湖泊富营养化严重，近50%重点城镇水质不符合饮用水标准，形成了污染性缺水问题。由此可见，如何使水资源得到保护，污水得到及时有效的处理并作为一种资源得到再一次的有效利用，已经成为我国面临的重要课题之一。

需要上本请访问 www.ertongbook.com

1.2　我国城市污水处理现状

20世纪70年代以来，我国开始了水污染防治方面的工作，污水处理事业有较大发展（见表1-2），但水污染恶化的局势未能得到有效控制，日趋严重的水污染不仅降低了水体的使用功能，而且加剧了水资源短缺的矛盾。例如全国663个城市中，有400多个城市常年供水不足，110个城市严重缺水，直接造成工业产值的损失约为2000亿元/a，对我国的可持续发展战略带来了严重的负面影响。

表1-2　1978～1994我国城市污水处理发展情况

年　份	污　水　量		处理厂	处　理　量		处理率
				日处理能力	年处理量	
	/($\times10^4m^3$/d)	/($\times10^8m^3$/a)	/座	/($\times10^4m^3$/d)	/($\times10^8m^3$/a)	/%
1978	4.095		37	57.1		1.4
1980	5.345		37	59.4		1.1
1982	5.076		39	65.9		1.2
1984	6.173		43	88.3		1.4
1986	6.240		64	176.7		2.8
1988	7.164		69	197.0		2.7
1990	8.052		80	277.3		3.4
1991		197.4	87	316.5	7.61	3.9
1992		198.4	100	366.3	8.88	4.5
1993		198.1	108	449.4	10.81	5.5
1994		200.1	139	539.5	13.50	6.7

注：1978～1990年，城市污水处理率按日处理污水能力计算，1991～1994年按年污水处理量计算。

据1994年的统计，我国城市污水排放量的增长速度为24亿立方米/a，而污水处理的增长率仅有1.1亿～1.3亿立方米/a，城市水环境呈总体恶化的趋势。2002年，我国的废水排放总量为439.5亿立方米。按预测，到2030年我国仅城市工业废水和生活污水排放量就将上升到885亿立方米。

2002年，全国污水排放量达439.5亿立方米，其中工业废水207.2亿立方米，生活污水232.3亿立方米，而全国污水处理能力只有113.6亿立方米/a，污水处理率仅为34.23%。与发达国家相比，我国城市污水处理厂的建设严重滞后。美国平均每1万人就有一座污水处理厂，欧洲许多国家平均每5000～8000人就拥有一座污水处理厂，而在我国的城镇人口中，平均每150万人才拥有一座污水处理厂。2002年生活污水处理能力每天约2544万立方米，2005年城市污水集中处理率计划达到45%，50万人口以上的城市计划达到60%以上。如果要达到这一目标，2005年污水处理能力每天应为5800多万立方米。仅仅依靠污水处理厂处理污水，建造污水处理厂资金需求大，就我国国力还无法达到。大量的生活污水若得不到有效处理，必然对江、河、湖和海域造成严重污染。污水排放量大、处理率低是我国现阶段存在的主要环境问题之一。

在污水处理工艺方面，我国80%以上的城市污水处理厂采用活性污泥法。这些以去除BOD和SS为主要目标的活性污泥技术在我国城市生活污水处理方面起到了重要作用。但传统污水处理工艺对氮、磷的去除率相对不高，容易引起水体富营养化。随着我国对水环境质量要求的提高，国家《污水综合排放标准》（GB 8978—1996）特别对出水氮、磷的要求提高，城市污水处理厂必须考虑氮、磷的去除问题。另一方面，生活污水和工业废水中新合成化学品比例增加，难降解有机污染物数量和种类的增加进一步增大了污水中氮、磷的含量，

现有的技术已经不能满足发展的需要，污水脱磷、除氮工艺亟待开发和应用。

1.3 城市污水的无害化、资源化生态学处理

1.3.1 污水资源化是解决我国水资源短缺的必由之路

我国是世界上13个贫水国家之一，人均水量仅为世界人均水平的1/4，居世界149个国家的110位。全国城市每年缺水60亿立方米，日缺水量已超过1600万立方米，且呈继续扩大趋势。事实上，很多地区不是没有水，而是无可用之水。据水利部组织的全国六大流域的入河排污口抽样调查，其中80%以上的污水未经处理直接排入水域，90%以上的城市水域污染严重。全国因污染而不能饮用的地表水占全部监测水体的40%，流经城市的河段中78%不适合作为饮用水源，50%的地下水受到污染，64%的人正在使用不合格的水源。因此水污染是造成多数城市缺水的重要原因。

解决水污染问题不能仅仅依靠常规处理技术。理论和实践均表明，传统的污水处理技术基建与运行费用高，我国目前的经济实力难以承受，即使普及二级常规处理，也远不能解决诸如水体富营养化等问题。目前，我国的污水治理大部分仅停留在单纯的水污染控制上，以此获取局部的经济利益与社会效益，而未达到全方位的水环境治理。所谓全方位的水环境治理，就是做到从单纯的水污染控制处理上升到水循环过程的治理，即做到人为的处理、利用与自然界的循环相融合。

为应对严峻的水环境污染问题，在未来的城市化建设过程中，对水资源利用政策以及污水治理与资源化等方面必须有本质的改变与升华：第一，改变对水资源概念的认识，不能仅仅认定现存的地面水、地下水为水资源，还应扩大到包括可利用的污（废）水资源；第二，污水治理技术的升华，即将多项治理技术集成，通过集成技术处理，使污水达到资源化的程度；第三，水资源利用政策上要充分体现出污水再利用的调配水资源原则，不应片面强调取用新鲜水源与远距离调水，只有这样，才能使新建城镇周围的水体保持洁净，才能使已受污染的境内河流的水质逐渐得以修复，才能使我国的经济具有跨越式、追赶式可持续发展的能力；第四，城市污水资源化具有开源节流、减轻水体污染、改善生态环境、解决城市缺水的多功能作用。所以，污水资源化不仅仅针对我国北方或缺水地区，就是南方水资源较丰富的地区，也应将污水资源化纳入城市供水规划，否则，将有可能出现“人为缺水城市”。

所谓污水资源化，即将污水视为一种资源，通过各种处理技术，使其净化达到某种用水标准，从而实现大部分净化水的循环再利用，同时减少污水排放对环境造成不良影响的这样一个过程。通过实施污水资源化，实现水资源的重复利用，从而缓解水资源紧张问题。所以污水资源化是解决我国水资源短缺的必由之路。但是，我国的污水资源化利用率还很低，其中工业废水资源化利用率只有60%，城市污水资源化利用率更低。而在一些发达国家，污水资源化程度相对较高，如以色列的城市污水资源化利用已经达到了90%。

目前，我国城市污水二级处理率在不断提高。但是，仅靠污水二级处理仍不能完全实现污水处理无害化和资源化。我国政府自1980年以后，确定了根据我国国情与各地区的自然和社会经济情况，实行人工处理和自然处理并行的技术政策，在吸收与改进发达国家传统的污水人工处理技术同时，积极推行替代二级处理的氧化塘、氧化沟和土地处理等自然处理技术。实施污水处理无害化、资源化，处理与利用相结合，人工处理与自然处理并行的技术政策，是完全必要和符合国情的。具体可以从以下两点解释。

（1）就污水水质而言，我国的城市污水基本上是生活污水与工业废水混合排放。其成分复杂多变，大体可以分为四类：①特殊的有毒污染物，包括生物难降解的人工合成的有机毒物、某些重金属元素以及某些致病微生物和病毒等；②营养物质，包括氮、磷、钾和某些微

量元素；③生物可降解的有机物；④固体悬浮物。针对第一类污染物应当进行特殊的无害化处理，不能将其留待污水处理厂集中处理，更不可以将其排放到自然水体。而对于上述第二、三、四类污染物，进一步采取处理与利用相结合的方针，通过不同类型生态工程、土地处理工程，实现污水处理与中水资源开发、水肥资源利用相结合的目的。

（2）就污水量而言，大城市污水水量大，污水成分复杂，其市政经济承受能力强，应当以人工处理技术为主，实行集中处理；而中小城市污水水量小，污水成分简单，城市周围寻找可以用作土地处理的土地资源丰富，地价相对便宜，因此，应当结合可以实施的以自然处理技术为主的无害化、资源化污水处理政策。

目前，国内外污水资源化利用研究主要是针对城市污水进行的，经再生的水主要用于农业灌溉、工业的循环冷却水或低质工艺用水、城市杂用水等。资源化技术也仅为二级生物处理出水的再处理，包括传统处理（混凝、沉淀、常规过滤）、生物处理、活性炭吸附、膜分离、消毒、土地处理等。随着水污染日益严重及人们对生活质量要求的提高，污水处理不再仅限于排水系统中，给水中也同样存在“污水处理”，即微污染水源给水预处理问题。污水资源化利用也相应地贯穿城市给水、用水、排水的全过程。

1.3.2　土地处理是污水资源化的重要途径

由于传统处理方法对氮、磷去除效果差，不能从根本上解决诸如水体富营养化等水污染问题。活性污泥法、生物膜法和膜生物法等常规污水人工生物处理，都存在着基建投资大、运行费用高、剩余污泥处理难度大等缺点。而活性炭吸附由于投资大等原因限制了其大规模推广使用。由于我国的经济发展水平所限，不可能像发达国家，通过修建三级污水处理厂进行污水深度处理，实现污水资源化利用，解决水污染问题，而土地处理却以其低投资、低能耗、运行管理方便等特点，已成为我国城市污水资源化的最简便的途径。

根据处理目标、处理对象的不同土地处理系统可分为慢速渗滤系统（SR）、快速渗滤系统（RI）、地表漫流系统（OF）、湿地系统（WL）、地下渗滤系统（SC）五种类型。各种土地处理系统的工艺条件与工程参数列于表 1-3。以土地处理系统为代表的污水自然处理技术，不仅对各种污染物有极高的去除效率，并可实现污水的处理与利用相结合的目的，其投资及运行费用为常规处理的 1/3～1/2；既可替代常规处理，又可作为常规处理的深度处理技术，是常规处理的一种革新与替代技术；而且，工业用水的 80％和生活用水的 60％并不需要十分洁净的水质，土地处理系统的出水可以作为中水进行回用，推行土地处理技术，开发中水资源，是实现污水处理无害化、资源化的重要途径之一，是解决水资源危机的重要技术政策。土地处理技术经过“七五”、“八五”联合科技攻关，实现了从小试、中试到使用规模的试验、示范研究，取得了大量的研究成果及运行管理经验，确定了完整的技术分类系统，明确了各种类型的工艺特征、技术要点与工程参数，为在我国推行这一技术提供了技术保证。目前已有新疆、河南、山东等地的土地处理系统实用工程正在营建或运行。可以预计，随着我国经济的发展，水环境问题的日益突出，土地处理必将在我国得到迅速发展。

表 1-3　各种土地处理系统的工艺条件与工程参数

处理类型	水力负荷/(m/a)	土壤浸透系数/(m/d)	土层厚度/m	地下水位/m	地面坡度/％
慢速渗滤系统	0.6～6	0.036～0.36	＞0.6	0.6～0.3	≤30
快速渗滤系统	6～150	0.36～0.6	＞1.5	＞1.0	＜15
地表漫流系统	3～21	≤0.12	＞0.3	NL	＜15
湿地系统	3～30	≤0.12	＞0.3	NL	＜2
地下渗滤系统	0.4～3	0.036～1.2	＞0.6	＞1.0	＜15

1.3.3　慢速渗滤土地处理系统与传统污水灌溉的区别

污水慢速渗滤土地处理系统（SR-LTS）在某种意义上源于传统的污水灌溉，但绝不等

同于污水灌溉。土地处理技术已经发展为完整的水处理工程体系，必须从基本认识到具体做法，从理论与实践的结合上将两者加以区别，其重要区别有以下四个方面（Sun 和 Ou，1994），参见表 1-4。

表 1-4 污水灌溉与慢速渗滤土地处理系统的区别

比较项目	主要目的	类 别	运行	生态结构	污染物负荷	场地条件	设计、管理	水迁移	承接水体保护
污水/植物	作物产量，肥源、水源	污水灌溉水利工程	作物生长/灌溉季节	单一植被	不考虑	不严格	作物产量	允许径流	不考虑
慢速渗滤土地处理系统	污水处理	污水处理生态工程	终年运行	多种植被	考虑	严格	作物产量、进水出水、环境、再利用、储存	渗滤、无径流	考虑

（1）设计目标与利用方向 传统污水灌溉是一项农田水利工程，其主要目的是利用污水，提高作物产量，很少考虑系统的连续运行，用水则灌，不用则放，依作物的物候期、对水的需要而确定灌水时间与灌水水量。相反，土地处理则强调水的可处理性，是一项水处理工程，实行污水处理的终年连续运行。

（2）污染负荷控制 传统的污水灌溉是把污水作为水肥资源加以利用，在进行灌溉时只注意水质和水量。而土地处理则强调单位面积污染负荷与同化容量计算，从各项限制条件中求出最低限制因子作为决定水力负荷设计参数。

（3）生态结构 传统的污水灌溉通常是单一种植，而土地处理系统则应设计有多样化种植的生态结构，以便针对不同污染负荷设计，在不同种植单元上进行水力负荷的有效分配，保证系统在最佳状态下的连续运行。

（4）保护承接水体 经土地处理后的出水，作为中水资源，可以重复利用。例如，可注入地下，可放流河道，可浇灌绿地、农田，也可冲洗车轮、街道和厕所。其前提是保证土地处理系统的稳定、正常运行，保证其净化后的水质要好于将要注入的承接水体水质。通常快速渗滤系统再生水的回收率可达到 80%，慢速渗滤系统达 30%，地下渗滤系统可达 70%。

1.3.4 土地处理系统的生态工程特征

生态工程是模拟自然生态系统的原理，利用现代生产技术而建立的物资的良性循环，能量的多级利用，高效率、低能耗、无废物、无（少）污染的生产工艺体系。土地处理系统在原理上是应用自然生态系统的调节功能，循环再生功能，为实现污水无害化、资源化而加以人工规划、设计和运行管理的生态工程系统。它具有以下若干特征。

（1）土地处理是一个具有完整的技术指标体系与工艺条件的生态工程系统。

土地处理不是一项万能的水处理技术，有它固有的边界条件与特定的内涵，并不是任何水质、任何作物、任何土壤与水文地质条件都可以接受土地处理技术。

土地处理可以接受的污水水质是以生活污水为主，并可接纳食品加工、畜牧业等有机污水。放射性污水、医院污水以及含有较多重金属、生物难降解污染物的工业废水，是不可以进入土地处理系统的。通常用 BOD/COD 和 TOC/BOD 作为衡量污水可生化性的重要指标（孙铁珩，1992）。BOD/COD 大于 0.3～0.5，可生化性好，可进入土地处理系统；小于 0.2，可生化性很差，不可进入土地处理系统。TOC/BOD 小于 0.8，可生化性好，土地处理系统可以接纳；大于 1.0，可生化性差，不可以进行土地处理。

（2）土地处理系统是一个复杂的多功能生态工程系统。

① 生产功能 土地处理是有目的的生产活动。其生产对象是种植植物、处理污水，以

水、肥资源换取种植植物的高产。传统的二级生化处理不能有效地去除污水中的氮、磷营养成分，将其排放至自然水体，导致富营养化，而土地处理则可以利用氮、磷作为肥源。通常城市污水含全氮 20～40mg/L，折合污水含有硫铵肥分 0.1～0.2kg/m^3。如果以每年处理 7500m^3/hm^2[1]污水，污水中含全氮 20mg/L 计，则每年污水可供给作物氮 10kg，不施用化肥也可满足作物所需氮肥供应量，可节约化肥 750kg/hm^2。

② 代谢功能　土地处理系统以土壤-植物系统对污染物进行分解、净化，实现其无害化、资源化。可降解有机物通过降解、转化为中间或最终产物。有机氮可以通过矿化（氨化）—硝化—反硝化过程，实现其最终分解。以下三种类型土地处理可以承受的有机污染负荷（BOD），可以显示其具有很强的代谢功能：慢速渗滤 50～500kg/(hm^2·d)；快速渗滤 145～1000kg/(hm^2·d)；漫流系统 40～110kg/(hm^2·d)（高拯民等，1990）。

③ 调节功能　土地处理系统对污水的冲击负荷具有较强的缓冲能力。通过规划、设计和运行管理，可以实现有效的调控。

针对不同水质、不同处理类型以及不同净化水质要求，确立对污染源与预处理系统的水质、水量要求；通过对于输入-转化-输出水质、水量“流”的动态分析，确定系统的同化容量与承载能力；通过污染负荷（BOD、氮、其他有机和无机污染物）计算，确立工程运行的最小限制因子和约束条件；通过水力负荷在时间与空间分布的科学设计，选择耐污染负荷、耐水力负荷、多吸收氮和磷、不参与食物链循环的能源作物、经济作物作为水量分配的调节系统，确定其面积比例、空间位置和运行周期；通过生态结构的最佳组合与功能分析，确立系统的运行参数：进出水 BOD/N、BOD/COD、TOC/BOD、N/P 及布水量、布水率、布水周期、干湿比等，以保证系统稳定运行。

（3）土地处理系统是一个多目标体系生态工程。

土地处理系统是一项兼顾社会、经济和生态三大效益统一，求得综合效益的多目标生态工程技术。

① 以经济效益为目标　土地处理是一项投资少、能耗低、运行管理简单的水处理工程技术。根据 20 世纪 90 年代初的设计标准，传统二级生化处理（以活性污泥法为例）的一次性基建投资标准为 1200 元/(m^3·d)，如果附加有脱氮工程设施，其基建费将为 1500～1800 元/(m^3·d)。而土地处理系统，因地域差异和处理类型不同，其一次性基建投资可变动在 500～700 元/(m^3·d)，大体为传统二级处理的 1/3～1/2，土地处理的运转费为传统二级处理的 1/10～1/5 不等。

同时，传统二级污水处理是纯消耗型水处理技术，土地处理则具有种植作物与处理污水的双重目的。水资源、肥资源、栽种作物的产值三者之和的经济效益是传统二级处理法所无可比拟的。种植作物的产值则因地区的经济条件与植物种类而不同。据 1986～1990 年沈阳地区开展的土地处理试验结果表明，不同植物年净得产值为水稻 3750 元/hm^2、紫穗槐 3000 元/hm^2、垂柳 9000 元/hm^2、能源高粱 9000 元/hm^2，在生态结构配置中，以水稻为主体系统，紫穗槐、垂柳和能源高粱为水力负荷调配系统，占主系统种植面积的 1/10，故组合在一起的完整土地处理系统的年净得产值为 4300 元/hm^2，比单一种植水稻的非土地处理系统增加产值 14.0%；在辽宁盘锦湿地土地处理试验，净收芦苇产值 900 元/hm^2；1991～1995 年在内蒙古霍林河地区进行的森林型慢渗土地处理试验，每株树平均年净增值 1 元，每年可净增值 4500～6000 元/hm^2。

② 以水资源利用为目标　约有 80%的工业用水对水质要求并非十分严格，如冷却用水、农业用水占社会总用水量的 70%～80%，其水质以国家规定的地面水质最低的

[1] 1hm^2=10^4m^2，下同。

Ⅴ级为标准，而生活用水中的所谓“大生活用水”（浇灌花草、绿地、冲洗车轮、厕所）约占生活用水的50%～60%。水资源短缺在我国北方地区日益突出，将是某些地区工农业生产发展的制约因素。因此，开发中水资源，提高水资源重复利用率，是我国水资源开发的重要方面。

③ 以防止二次污染，保护承接水体为目标　土地处理利用其土壤-植物系统的调节功能，对于接收污水的冲击负荷具有强大的缓冲作用，从而可以保证出水水质稳定，保护承接水体免受污染。这与传统二级生化处理方法在遇到水质突然变动（冲击负荷）时表现为污泥膨胀、出水水质恶化相比，具有明显优势。表1-5列出了沈阳慢速渗滤土地处理系统排出渗滤水达到的质量等级。在处理系统出水的21项水质监测指标中分别达到我国规定的5级地面水体标准：Ⅰ级11项；Ⅱ级4项；Ⅲ级3项；Ⅳ级2项；Ⅴ级1项（高拯民等，1986）。可见，运行良好的土地处理系统出水排入其承接水体，非但不会导致二次污染，而且具有改善水体水质的作用。

表1-5　沈阳慢速渗滤土地处理系统排出渗滤水达到的质量等级①　单位：mg/L

参数		分类					沈阳慢速渗滤土地处理系统排出渗滤水	
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	浓度	达到等级
BOD_5	≤	3	3	4	6	10	2.76	Ⅰ
COD	≤	15	15	20	30	40	26.90	Ⅳ
TN(湖、库以N计)	≤	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.80	Ⅴ
TP	≤	0.02	0.1	0.2	0.3	0.4	0.135	Ⅳ
		0.01②	0.025②	0.05②	0.1②	0.2②		
DO	≤	饱和率90%	6	5	3	2	4.33	Ⅳ
Cd	≤	0.001	0.005	0.005	0.005	0.01	0.002	Ⅱ
挥发酚	≤	0.002	0.002	0.005	0.01	0.1	0.002	Ⅰ
氰化物	≤	0.005	0.05	0.2	0.2	0.2	0.005	Ⅰ

① 分类级别引自国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)；排出的渗滤水为1987～1989年三年连续运行的平均值。

② 湖和水库的标准。

（4）土地处理系统具有明显的区域特征和特定的场地环境条件。

土地处理系统必须体现工程特色，具有严格的实施程序：规划—设计—施工—运行—监测—研究，而实现这些程序的前提是土地处理系统的明显区域特征和特定的场地环境条件。不同的自然气候带、不同的水文地质条件、不同的处理水量与水质类型，需要有相应的土地处理形式，并不是任何土壤环境条件、水质、水量、作物类型都可以实施土地处理。影响土地处理区域和场地环境条件的主要因素有以下两种。

① 社会环境条件　实践表明，在我国实施土地处理的规模效应以$(1\sim2)\times10^4 m^3/d$为宜。地下毛管渗滤系统的规模效应是$50\sim200 m^3/d$。如果处理水量过大，应当以上述规模设计不同处理单元。通常认为，在大城市排污水量大（$>1.0\times10^6 m^3/d$），水质复杂（含工业废水70%以上）、土地价格昂贵（15万元/hm^2）的郊区，不适宜发展土地处理技术。

② 自然环境条件　不同类型土地处理系统各自要求特定场地条件。例如，慢速渗滤土地处理要求的土壤渗透系数$k=0.036\sim0.36 m/d$，水力负荷0.5～6m/a；快速渗滤土地处理的$k=0.36\sim0.6 m/d$，水力负荷6～150m/a，用于土地处理的土层厚度必须大于1m，地下水位大于2m以上。漫流系统则要求土壤性差的缓坡地（2%～5%比降）等。

1.4　城市规模与城市污水处理模式选择

处理城市污水有活性污泥、生物膜、氧化沟等人工处理方法，也有土地处理系统、稳定塘、排海技术等自然处理方法，这些处理方法基本都属于生物化学法（处理方法有物理化学法、化学法和生物化学法）。由于城市污水中污染物主要以有机物为主，所以比较适合采用生物化学法处理。

在众多的城市污水处理工艺选型中，对于各类城市采用哪种工艺类型是一个复杂的技术经济问题，应因地制宜综合比较。通过可行性研究，论证采用的工艺在技术上是否先进、适用、可靠，在经济上是否合理，最后推荐出最佳方案，以取得较好的生态效益、经济效益和社会效益。根据我国的实际情况，参照国外经验，提出我国城市污水处理的几点建议。

（1）大中城市适合开展土地处理系统研究，小城市适合推广土地处理系统。

大中城市可以提供研究土地处理系统的大污水量和复杂的水质，有利于研究土地处理系统。但大城市水质复杂、地价昂贵，不适合进行污水的土地处理；而小城市水量小、水质简单、土地便宜，适合推广土地处理系统。

（2）大城市以污水处理厂为主。

大城市（包括超大、特大城市，指人口在50万人以上的城市）在资金允许的条件下，宜修建标准活性污泥法的二级污水处理厂，理由有三点：①活性污泥法处理有机污染物效果好，BOD去除率可达90%～95%，属于高效完全处理法；②适应能力强，当水量增大、水质变浓时易改造成其他形式的运转方式；③有利于污水进一步处理后回用。

城市污水处理的重要一环是要解决处理水的回用问题，变废为宝，充分利用水资源。国外城市污水回用率平均达70%，而我国仅20%左右。在我国，特别是在北方，许多城市用水相当紧张，城市污水净化与回用是解决城市水资源不足的战略措施，通过建设现代化污水处理厂，提高处理水质量，并回用于城市，变污水为可依靠的水源。大城市污水处理一般不采用氧化塘和土地处理，因为：①氧化塘冬季净化效果差，土地处理技术可以因地制宜地在冬季运行，但其效果差；②占地面积大，氧化塘占地平均为二级生化处理厂的15倍，土地处理技术占地面积也比较大，尤其慢速渗滤系统在土地较贵的大城市不合适；③氧化塘污水停留时间长，平均为二级处理厂的20倍，淤积严重，易产生二次污染；④氧化塘在工程投资上不经济，环境要求氧化塘必须远离城市，这就要增加输水管道、提升设备及动力费用，其投资要增加。据资料介绍，氧化塘应用于大型城市污水处理，无论是否利用洼、荒地在工程投资上并不经济。

（3）中等城市和小城镇以土地处理和氧化塘为主。

中等城市（主要指20万～50万人口的城市）和小城镇（主要指20万以下城市）适合利用土地处理和氧化塘处理城市污水。理由如下：①中等城市和小城镇水质比较简单，主要以生活污水为主，没必要建大型污水处理厂；②氧化塘和土地处理技术造价低（连同必要的下水道建设，造价约为二级处理厂的1/4～1/2），运行管理简单，运转费用低（约为二级处理厂的1/6～1/3），而节约能耗是其主要特点；③中等城市和小城镇土地问题比较容易解决；④中等城市和小城镇的处理出水主要用于农业灌溉和水产养殖，利用土地处理可以充分利用污水中的氮、磷等营养物质，可以将氧化塘与土地处理结合起来。

我国目前面临着经济负担与生态效益的矛盾，解决方法应因地制宜地采取不同的处理工艺，将人工处理和自然处理结合起来。在现阶段大城市宜建标准活性污泥法污水处理厂，中小城镇应优先考虑用氧化塘和土地处理工艺。

1.5 污水土地处理的发展与应用

1.5.1 污水土地处理的发展

污水灌溉作为土地处理的前身，在欧美各国早在半个多世纪前就已经开始应用。据报道，法国 1920 年前污水灌田面积超过 1300hm^2。德国 1939 年有 69 处污水灌溉，在柏林至今仍有一座日处理污水 5.7×10^4 m^3，占地 110km^2 的牧草地灌溉系统。美国 1953 年共有污水灌溉 257 处。

我国污水灌溉事业的快速发展是在 20 世纪 50 年代末。出于当时农业大发展急需开发水肥资源的社会条件，在我国北方的西安、北京、天津、沈阳等大城市郊区，污水灌田得以迅速发展，从而为改变北方旱田农业为水田农业，促进农业水利建设起到了很大作用。据统计，至 1963 年，全国污水灌溉面积达 42000hm^2，1972 年达 93000hm^2，1976 年达 180000hm^2，1983 年达 330000hm^2。需要指出的是，进入 60 年代后，国外的污水灌田逐渐走向低潮。其原因主要有以下三点：(1) 随着工业化和城市化的迅速发展，以较低的价格征购到用于污水灌溉的土地变得愈加困难；(2) 以活性污泥法为主的人工二级生化处理技术迅速发展，其工程结构紧凑，占地面积小，机械化操作，对水质可进行迅速分解及其工程运行的有效管理等，均优越于污水灌溉；(3) 由于工业化迅速发展，城市污水中工业废水及有毒污染物的含量逐渐增多。同时，在实施污水灌溉工程设计中，缺少对农田水文地质条件的严格选择和污染负荷、水力负荷的科学计算与严格运行管理，从而导致某些公共卫生和社会人群健康问题，如恶臭、土壤及地下水污染、作物产量及生物学质量下降和某些污染物在食物链中的积累等问题的出现，引起了一些社会公众的异议。

在真正意义上作为水处理工程的污水土地处理系统是在 20 世纪 70 年代首先在美国被正式确认的。60 年代末，按美国全国人口计算，城市下水道普及率已达 73.5%，污水二级处理率已达 50%以上。但是，水体环境污染并没有因此而有所改善，湖泊水域水体富营养化开始出现。因此，西方水处理专家对污水二级人工处理技术提出种种评价，从而导致在水处理技术政策上的变化。

美国水处理专家温博格首先提出二级处理不能在根本上解决水污染问题。他认为即使全国污水全部达到二级处理标准，河湖中 BOD 也只能降低 40%，由于不完全的生化处理和生物难降解的有机污染物以及氮、磷等营养物的存在，污染将不会得到改善，至 20 世纪末全国水污染仍将维持在 60 年代后期水平。于是，美国在 70 年代后提出了所谓“零排放”政策，发展污水深度处理技术，开始兴建三级污水处理厂。其实践结果表明，即使美国这样经济发达国家也难以承受其技术经济负担。仅以 385m^3/d 污水处理规模的技术经济评估，其三级污水处理不但投资昂贵，能耗大（基建费和运行费分别增加 3.2 倍和 4.4 倍），而且污水深度处理需要投入的自然资源是从污水中去除污染物的 1.3 倍，是排入环境污染物的 1.6 倍。因此，至 1980 年美国 72%的三级污水处理厂停止运行，或降级使用。在这一社会背景下，美国提出革新/替代技术，开始鼓励发展污水土地处理技术，至 1981 年慢速渗滤系统发展 839 个，快速渗滤系统 323 个，漫流处理系统 18 个。

我国污水土地处理系统试验研究从 1981 年开始，是在总结多年污水灌田的经验与教训基础上，把美国、澳大利亚等国土地处理技术的先进经验加以引进、消化和吸收，使之成为符合我国国情的处理与利用相结合的污水处理工程技术。其技术目标是代二级处理。我国土地处理系统经历了如下发展历程（Sun 和 Ou，1994；Ou 和 Sun，1996）：1981～1985 年，土地处理技术实验室研究与田间小区试验；1986～1990 年，以中试规模（7～20hm^2）开展了不同类型土地处理试验研究（见表 1-6）；1991～1995 年，在不同地区开展了实用型生产

需要土木请访问 www.ei-book.com