

污水生态处理技术体系及发展趋势

孙铁珩

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘 要: 对污水的生态处理原理进行扼要论述, 对污水的生态处理技术体系进行较为全面地概括, 并就目前的应用条件与适用范围进行了阐述, 在简要回顾污水的生态处理技术发展历史的基础上对该领域今后的发展趋势进行了展望, 以推进污水生态处理系统的技术创新和在我国各地区的广泛应用, 为全面实施污水处理与水资源综合利用相结合的污水无害化与资源化战略提供科学依据与技术支撑。

关键词: 污水; 生态处理技术; 资源化; 无害化

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2004)03-0001-03

Wastewater Eco-treatment Technological System and Its Developing Trends

SUN Tie-heng

(Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Principles of wastewater eco-treatment were tersely expounded, technological system of wastewater eco-treatment was roundly summarized, and relevant applying conditions and applicable range of the technology were discussed. On the basis of having briefly retrospected developing history of the eco-treatment technology, future development and trends in the field were viewed aiming at the promotion of technical innovation of wastewater treatment and the wide use of the system in various areas, thus providing scientific basis and technological support for the wastewater harmless and resourceness strategy combined wastewater treatment with integrated use of water resources.

Key words: wastewater; eco-treatment technology; resourceness; harmless

从生态学的意义上, 污水是具有可利用价值的资源, 在当前水资源日益贫乏、紧缺的形势下, 如何利用好这些污水, 成为迫切需要解决的重要实际问题。污水生态处理技术的发展, 为污水资源化和回用提供了广阔的前景, 有助于缓和缺水地区的水资源紧张局面, 对减轻、消除富水地区水环境的污染也具有重要意义。

1 污水生态处理原理

污水生态处理技术是指运用生态学原理, 采用工程学手段对污水进行治理与水资源利用相结合的方法。具体地说, 就是把污水有控制地投配到土地上, 利用土壤—植物—微生物复合系统的物理、化学、生物学和生物化学特征对污水中的水、肥资源加以回收利用, 对污水中可降解污染物进行净化的工艺技术, 是生态学 4 大基本原理在水资源领域的具体运用。

1.1 循环再生原理

生态系统通过生物成分, 一方面利用非生物成分不断地合成新的物质, 一方面又把合成物质降解为原来的简单物质, 并归还到非生物组分中。如此循环往复, 进行着不停顿的

新陈代谢作用。这样, 生态系统中的物质和能量就进行着循环和再生的过程。污水生态治理技术的主要目标就是使生态系统中的非循环组分成为可循环的过程, 使物质的循环和再生的速度能够得以维持或加大。

1.2 和谐共存原理

由于循环与再生的需要, 污水的生态处理系统中各种植物与微生物种群之间、各种植物之间、各种微生物之间和生物与处理系统环境之间和谐共存, 植物给根系微生物提供生态位和适宜的营养条件, 促进微生物的生长和繁殖, 促使污水中植物不能直接利用的那部分污染物转化或降解为植物可利用的成分, 反过来又促进植物的生长和发育。如果该处理系统没有它们的和谐共存, 处理系统就会崩溃, 就不可能进行有效的污水治理。

1.3 整体优化原理

污水的生态处理技术涉及点源控制、污水传输、预处理工程、布水工艺、植物选择和再生水的利用等基本过程, 缺一不可, 它们构成污水生态处理系统的整体。对这些基本过程进行优化, 才能充分发挥处理系统对污染物的净化功能和对

水、肥资源的有效利用。

1.4 区域分异原理

由于不同区域在气温、土壤类型、微生物种群和水文条件等方面差异很大,导致污水中污染物质在迁移、转化、降解等生态行为上具有明显的区域分异。在污水的生态处理系统设计时,必须有区别地进行布水工艺与植物的选择及结构配置和运行管理。

2 污水生态处理技术体系

污水生态处理技术以土地处理方法为基础,是污水土地处理系统的进一步发展,以土壤介质的净化作用为核心,在技术上特别强调在污水污染成分处理过程中植物-微生物共存体系与处理环境或介质的相互关系,特别注意对生态因子的优化与调控。

2.1 慢渗生态处理系统

慢渗生态处理系统(Slow Filtering Eco-treatment System, SF-ETS)是指将污水投配到植物的土壤表面,污水在流经地表土壤-植物系统时得到充分净化的处理工艺类型。在该处理系统中,投配的污水一部分被植物吸收,一部分在渗入底土的过程中,其中的污染物被土壤介质截获,或被植物根系吸收、利用或固定,或被土壤中的微生物转化或降解为无毒或低毒的成分。工程设计时最重要的工艺参数是:(1)土壤渗透系数为 $0.36 \sim 0.360 \text{ m/d}$;(2)年水力负荷为 $0.6 \sim 6.0 \text{ m/a}$,年有机负荷为 $2.0 \times 10^3 \text{ kgBOD}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。其它需要考虑的场地工艺参数有:地面坡度 $< 30\%$,土层厚 $> 0.6 \text{ m}$,地下水位 $> 0.6 \text{ m}$ 。

根据实际需要,SF-ETS可设计为处理型与利用型两种类型,前者在尽可能小的土地面积上处理尽可能多的污水,选择的植物为有较高耐水极限、较大去除氮磷和有关污染物的能力、生长季长和管理方便的植物;后者一般应用于水资源短缺的地区,在尽可能大的土地面积上利用污水,以便获取更大的植物生产量。研究表明,草类植物最有利于使处理型SF-ETS的水力学负荷达到最大。目前,SF-ETS已发展成为替代三级深度处理的重要水处理技术之一,在一定条件下尚可替代二、三级处理。

2.2 快渗生态处理系统

快渗生态处理系统(Rapid Filtering Eco-treatment System, RF-ETS)是将污水有控制地投配到具有良好渗滤性能的土壤表面,污水通过重力作用在向下渗滤过程中经过生物氧化、硝化、反硝化、过滤、沉淀和还原等一系列作用而得到净化的污水处理工艺类型。其工艺目标主要包括:(1)污水处理与再生水补给地下水;(2)用地下暗管或竖井收集再生水以供回用;(3)通过拦截工程措施,使再生水从地下进入地表;(4)再生水季节性地贮存在具有回收系统的处理场之下,在作物生长季节用于灌溉。

在系统设计时,需要考虑的关键工艺参数主要有:(1)土壤渗透系数为 $0.36 \sim 0.6 \text{ m/d}$;(2)年水力负荷为 $6 \sim 150 \text{ m/a}$,年有机负荷为 $3.6 \times 10^4 \text{ kgBOD}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。此外,场地工艺参数的选择也是重要的,包括:地面坡度 $< 15\%$,土层厚 $> 1.5 \text{ m}$,地下水位 $> 1.0 \text{ m}$ 。由于RF-ETS对 BOD_5 、SS和

大肠杆菌等具有很高的处理效率,对植物类型没有严格要求,有时甚至在没有植物覆盖的情况下也能保证出水水质。如果结合适当的化学强化处理,可以完全保证该工艺在北方地区于严寒的冬天条件下也能正常运行,并可有效地缓解干旱地区水资源严重缺乏的问题。

2.3 地表漫流生态处理系统

地表漫流生态处理系统(Overland Flow Eco-treatment System, OF-ETS)是将污水有控制地投配到生长多年生牧草、坡度和缓、土地渗透性能低的坡面上,使污水在地表沿坡面缓慢流动过程中得以充分净化的污水处理工艺类型。该系统的工艺目标是:(1)在低预处理水平达到相当于二级处理出水水质;(2)结合其他强化手段,对有机污染及营养物负荷的处理可达到较高水平;(3)再生水收集与回用。

适合OF-ETS建设的工艺条件与参数主要有:(1)地面最佳坡度为 $2\% \sim 8\%$;(2)土壤类型选择渗透性能低的土壤,以黏土、亚黏土最为适宜,或在 $0.3 \sim 0.6 \text{ m}$ 处以下有不透水层;(3)年水力负荷为 $3 \sim 21 \text{ m/a}$,年有机负荷为 $1.5 \times 10^4 \text{ kgBOD}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;(4)植物类型选择是保持系统有效运行的最基本条件,以根系发达、对污染物耐性强且具有一定吸收固定能力的植物为主,避免作物作为处理组分进入系统,因此常常采用不同类型的草类进行混合种植。

由于OF-ETS对污水预处理要求程度较低,出水以地表径流收集为主,对地下水影响最小,在处理过程中,除少部分水量蒸发和渗入地下外,大部分再生水经集水沟回收。

2.4 湿地生态处理系统

污水的湿地生态处理系统(Wetland Eco-treatment System, W-ETS)是将污水有控制地投配到土壤-植物-微生物复合生态系统,并使土壤经常处于饱和状态,污水在沿一定方向流动过程中在耐湿植物和土壤相互联合作用下得到充分净化的处理工艺类型。该处理系统的工艺目标包括:(1)直接处理污水;(2)对经人工或其它工艺处理后的污水进行再处置或深度处理;(3)利用污水营造湿地自然保护区,为野生群落提供有价值的生态栖息地。

在进行W-ETS设计时,需要考虑的工艺参数包括:

(1)土壤渗透系数 0.12 m/d ;(2)年水力负荷为 $3 \sim 30 \text{ m/a}$,年有机负荷为 $1.8 \times 10^4 \text{ kgBOD}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;(3)地面坡度 $< 2\%$,土层厚度 $> 0.3 \text{ m}$;(4)最常用的修复植物有芦苇属、灯芯草属、香蒲属和菴草属植物

按照生态单元,W-ETS可分为自然W-ETS、人工W-ETS和构造W-ETS等3大基本类型。其中,自然W-ETS是在天然湿地基础上在不改变其基质的前提下辅以必要的工程措施而建成的污水处理系统,人工W-ETS是在人工湿地基础上在不改变其基质的前提下辅以必要的工程措施而建成的污水处理系统,构造W-ETS则主要是指通过工程技术手段改变湿地基质或重新建造的湿地状污水处理系统。按照水流路径,构造W-ETS可划分为水平表面流W-ETS、垂直流W-ETS、亚表面或潜流W-ETS及浮筏系统(Floating Raft System)等。其中,表面流构造W-ETS

类似于自然W-ETS,水流运行速度低,基质通常由砂砾、碎石、黏土或泥炭土等介质组成;在亚表面或潜流W-ETS中,污水以水平流或垂直流穿过基质,基质由土壤、砂、岩石或人工介质组成,净化过程发生于污水与介质表面、植物根际圈相接触时,在污染物的去除上比表面流构造W-ETS更为有效。对于有机污水的处理,构造W-ETS的使用寿命大约为20年。

近年来,湿地生态处理系统远远超出了污水处理本身的意义而成为积极营造湿地环境、涵养水源、保护野生生物与生物多样性的生态工程技术。特别是通过生态建设,形成美学“斑块”与功能景观,可与居民区镶嵌发展,为当地居民提供游乐场所。

2.5 地下渗滤生态处理系统

地下渗滤生态处理系统(Subsurface Infiltration Ecosystem, SI-ETS)是将污水投配到具有一定构造和良好扩散性能的地下土层中,污水经毛管浸润和土壤渗滤作用向周围和向下运动过程中达到处理,利用要求的污水处理工艺类型。该处理系统主要应用于分散的小规模污水处理,其工艺目标主要包括:(1)直接处理污水;(2)在地下处理污水的同时为上层覆盖绿地提供水分与营养,使处理场地具有良好的绿化带镶嵌其中;(3)产生优质再生水以供回用;(4)节约污水集中处理的输送费用。

保证SI-ETS技术有效性的工艺参数有:(1)年水力负荷为 $0.4 \sim 3.0 \text{ m}^3/\text{a}$,散水管最大埋深 1.5 m ;(2)需要有专门配制的特殊土壤,土壤渗透率为 $0.15 \sim 5.0 \text{ cm/h}$,地表植物为绿化植物;(3)土层厚大于 0.6 m ,地面坡度小于 15% ,地下水埋深大于 1.0 m ;(4)对预处理要求低,一般化粪池出水即可;(5)再生水回收,回收率在 70% 以上。

由于SI-ETS全部处理过程均在地下完成,是一项终年运行的实用工程,特别适用于在北方缺水地区推广应用。

2.6 应用条件与适用范围

为了实现污水生态处理系统的安全运行,必须考虑这样2个方面的因素。首先是应用条件的问题:在目前工艺条件下,必须对进水水质进行控制,采用进水双指标控制体系。即10个污染物单项指标和 $\text{TOC}/\text{BOD}_5 < 0.8$ 。其次是适用范围的问题:实践表明,慢渗生态处理系统、快渗生态处理系统,地表漫流生态处理系统和湿地生态处理系统完全适用于城镇生活污水的治理,适宜规模在 $100 \sim 150\,000 \text{ m}^3/\text{d}$;地下渗滤生态处理系统适用于社区、郊区和村镇生活污水的处理,适宜规模为 $50 \sim 300 \text{ m}^3/\text{d}$,我们的研究还表明,这些生态处理系统对食品加工工业污水和酿造工业有机污水的处理以及对农业面源污染的治理也是适用和有效的。

3 污水生态处理技术发展趋势

3.1 污水生态处理技术的发展

原始的污水生态处理形式是污水灌溉,这是污水生态处

理技术发展的第一阶段,它主要利用污水的水肥资源以提高作物的产量,很少考虑处理系统的连续运行,用水则灌,不用则放,其后果往往导致灌溉土地的污染问题。

为了避免灌溉土地的污染,防止污水穿透处理系统污染地下水及承接水体现象的发生,污水的土地处理系统得到了研制。这是污水生态处理技术发展的第二阶段,其主要特点是在设计时考虑处理系统的环境同化容量。根据环境同化容量,对处理系统所承受的水力及污染负荷进行严格的限制,但该阶段的主要问题是污水的处理为主要目标,很少兼顾水资源的利用问题,而且没有脱离食物链影响的经济作物利用方式。

90年代以来,以污水处理为主要目的的土地处理技术逐渐向以处理与利用相结合为特色的污水生态处理技术发展,并逐渐脱离食物链影响的经济作物利用方式。建立多样性生态结构水力负荷分配的调节系统,挖掘处理系统的潜力,注重处理系统的和谐共生。

3.2 联合式生态处理系统

如何对上述5个类型的系统进行恰到好处的并联或工艺参数的系统优化以解决北方寒冷地区终年运行的问题,是污水生态处理技术今后所要继续解决的关键技术问题:如何对上述5个类型之一或相互之间进行系统串联和工艺参数的系统优化以更有效地提高处理水质,也是污水生态处理技术今后所面临的关键技术问题,也就是说,联合式生态处理系统是污水生态处理技术发展的主要趋势之一。

3.3 强化式生态处理系统

为了使生态处理系统的有效性进一步提高,适用性更加广泛,一方面是采用物理处理法(如吸附法、重力法、离心法和引力法等)、化学处理法(如凝聚法、提取法、氧化法、离子交换法和沉淀法等)和生物处理法(如活性污泥法、SBR和BSAR等)对处理系统进行强化,另一方面是利用基因工程和生物技术,筛选超积累、高耐性修复植物和具有特异降解功能的微生物进入处理系统,即构成强化式生态处理系统,这是污水生态处理技术今后发展的另一主要趋势。它主要面向解决2个方面的技术问题:(1)增加处理规模,在单位时间内处理更多的城市生活污水;(2)进一步放宽进水水质,部分或全部接纳工业污水或其它有毒、有害污水。

4 结 语

污水生态处理技术基本上不涉及化学能的投入和化学品的消耗。根据国情,我国的污水治理必须走生态处理技术的道路,尤其提倡以联合式或强化式生态处理技术为主,对污水进行综合治理。根据污水的生态处理技术特点,污水的生态处理技术在我国的发展战略应遵循这样两大基本原则:(1)污水处理与水资源的利用相结合;(2)选择具有特异修复功能、与食物链相脱离的植物代替传统的作物利用水资源的方式。