

文章编号: 1006-6780(1999)06-0088-05

# 人工湿地污水处理技术及其发展应用

23  
88-92

白晓慧, 王宝贞, 余敏, 聂梅生  
(哈尔滨建筑大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

X703

**摘要:** 叙述了人工湿地污水处理技术的概念、分类、特点、原理及其在国内外的研究应用现状。人工湿地系统是一个完整的生态系统, 是正在不断得到研究应用和发展的污水处理实用新技术, 具有投资低, 出水水质好, 抗冲击力强, 增加绿地面积, 改善和美化生态环境, 操作简单, 维护和运行费用低廉等优点。这项技术适合我国国情, 尤其适合广大农村、中小城市的污水处理, 具有极其广阔的应用前景。

**关键词:** 人工湿地; 污水处理; 发展; 应用

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A

## Development of constructed wetland wastewater treatment technology and its application in China

BAI Xiao-hui, WANG Bao-zhen, YU Min, NIE Mei-sheng

(School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin University of Civil Engineering & Architecture, Harbin 150090, China)

**Abstract:** This paper mainly describes the concepts, character, classification, principle and the status of research and application of wetland wastewater treatment technology. The constructed wetland system is an integrated ecosystem, it's also a new wastewater treatment technology being developed and applied. It has such advantages as low investment, high quality effluent, increase of green land, simple performance, cheap operation fee ect. It's a suitable technology for our China, especially for the rural areas and small cities.

**Key words:** constructed wetland; wastewater treatment; development; application

### 1 人工湿地污水处理系统的概述

#### 1.1 人工湿地概念

湿地系指不问其为自然或人工、长久或暂时之沼泽地, 湿原, 泥炭地或水域地带; 带有或静止或流动, 或为淡水, 半咸水或为咸水水体者, 包括低潮时水深不超过6m的水域。

湿地是陆地与水体之间的过渡地带, 是一种高功能的生态系统, 具有独特的生态结构和功能。对于保护生物多样性, 改善自然环境具有重要作用。由于人类的不合理开发, 湿地资源在我国受到很大破坏。在特殊时期和环境条件下, 研究和建立人工湿地生态系统是对自然湿地生态系统的适度补充, 也是对其功能退化的恢复性建设。人工湿地是一种由人工建造和监督控制的, 与沼泽地类似的地面<sup>[1]</sup>。

湿地能净化污水, 是自然环境中自净能力很强的区域之一。它利用自然生态系统中的物理、化学和生物的重重协同作用, 通过过滤、吸附、共沉、离子交换、植物吸收和微生物分解来实现对污水的高效净化。

#### 1.2 人工湿地的分类

人工湿地根据湿地中主要植物形式可分为: 1. 浮生植物系统; 2. 挺水植物系统; 3. 沉水植物系

收稿日期: 1998-04-20

作者简介: 白晓慧(1969-), 男, 哈尔滨建筑大学博士生。

统。沉水植物系统还处于实验室阶段，其主要应用领域在于初级处理和二级处理后的精处理。浮水植物主要用于 N、P 去除和提高传统稳定塘效率。目前一般所指人工湿地系统都是指挺水植物系统。挺水植物系统根据水流形式可建成自由表面流、潜流和竖流系统<sup>[2]</sup>。

### 1.3 人工湿地的构造

绝大多数自然和人工湿地由五部分组成：1. 具有各种透水性的基质，如土壤、砂、砾石；2. 适于在饱和水和厌氧基质中生长的植物，如芦苇；3. 水体（在基质表面下或上流动的水）；4. 无脊椎或脊椎动物；5. 好氧或厌氧微生物种群。

湿地系统正是在这种有一定长宽比和底面坡度的洼地中由土壤和填料（如砾石等）混合组成填料床，废水在床体的填料缝隙中流动或在床体表面流动，并在床体表面种植具有性能好、成活率高、抗水性强、生长周期长、美观及具有经济价值的水生植物（如芦苇、蒲草等）形成一个独特的动植物生态系统，对废水进行处理。

其中湿地植物具有三个间接的重要作用：1. 显著增加微生物的附着（植物的根茎叶）；2. 湿地中植物可将大气氧传输至根部，使根在厌氧环境中生长；3. 增加或稳定土壤的透水性。

植物通气系统可向地下部分输氧，根和根状茎向基质中输氧，因此可向根际中好氧和兼氧微生物提供良好环境。植物的数量对土壤导水性有很大影响，芦苇的根可松动土壤，死后可留下相互连通的孔道和有机物。不管土壤最初的孔隙率如何，大型植物可稳定根际的导水性相当于粗砂 2~5 年。

而土壤，砂，砾石基质具有：为植物提供物理支持；为各种复杂离子、化合物提供反应界面，为微生物提供附着。水体为动植物、微生物提供营养物质。

### 1.4 人工湿地污水处理系统

人工湿地污水处理系统由预处理单元和人工湿地单元组成。通过合理设计可将 BOD<sub>5</sub>、SS、营养盐、原生动物、金属离子和其它物质处理达到二级和高级处理水平。预处理主要去除粗颗粒和降低有机负荷。构筑物包括双层沉淀池、化粪池、稳定塘或初沉池。人工湿地单元中的流态采用推流式、阶梯进水式、回流式或综合式。见图 1。

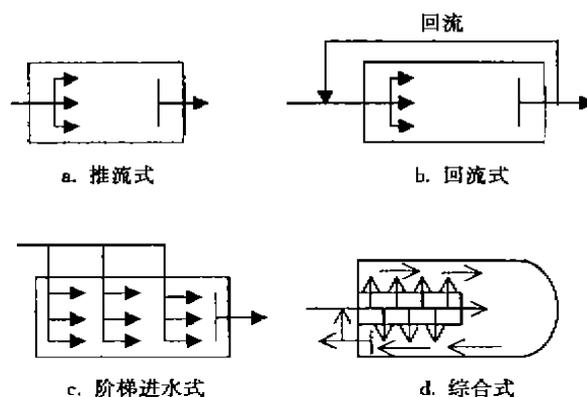


图 1 人工湿地中的基本流态

### 1.5 人工湿地污水处理系统的特点

人工湿地系统具有如下优点：1. 建造和运行费用便宜；2. 易于维护，技术含量低；3. 可进行有效可靠的废水处理；4. 可缓冲对水力和污染负荷的冲击；5. 可提供和间接提供效益，如水产、畜产、造纸原料、建材、绿化、野生动物栖息、娱乐和教育。

但也有不足：1. 占地面积大；2. 不精确的设计运行参数；3. 生物和水力复杂性及对重要工艺动力学理解的缺乏；4. 易受病虫害影响。

人工湿地系统在达到其最优效率时，需 2~3 个生长周期。因为据已有数据，当上下表面植物密度增大时，处理效率提高，所以需建成几年后才达到完全稳定的运行。目前人工湿地技术最大问题在于缺乏长期运行系统的详细资料<sup>[3]</sup>。

## 2 湿地废水处理技术历史沿革

采用湿地改善水质并非是一个新发明。当人们开始排放污水或废水时，湿地就开始用于净化污水。废水通常直接或间接排入洼地，若当时没有湿地，污水的排放也会很快导致湿地的形成（Cooper and Boon, 1987）。即使今天，从单幢住宅和乡村农场排出的污水还在居住地很近的沟渠或地下过滤系统处理，这常在排放地形成典型的湿地。用于废水处理的这些系统很少，但在许多地区一直被作

为一种普遍认同的方法。人工湿地 (Constructed wetland) 这个词是个很新的发明, 但此概念已很老, 我们知道古代中国和埃及使用此法已有多数。但最早公开报道是由澳大利亚 Brian Mackney 于 1904 年发现的一篇文章<sup>[4]</sup>。

1953 年, 德国的 Dr. Kathe Seidel 在其研究工作中发现芦苇能去除大量有机和无机物。Dr Seidel 通过进一步实验发现一些污水中细菌在通过种植的芦苇时消失 (大肠菌、肠球菌、沙门氏菌) (Seidel 1964, 1966)。实验表明芦苇及其他高大植物能从水中去除重金属和碳水化合物。进入 60 年代, 这些实验室观察开始推广至许多大规模实验用以处理工业废水、江河水、地面径流和生活污水 (Seidel 1978) 并由 Dr. Seidel 开发出一种 “Max - planck Institute - Process”。该系统由四或五级组成, 每级由几个并联并栽有挺水植物的池子组成。该系统存在堵塞和积水问题<sup>[5~7]</sup>。

根据 Dr. Seidel 的思路, 荷兰于 1967 年还开发了一种现称为 Lelystad Process 的大规模处理系统, 该系统是一个占地一公顷的星形自由水面流湿地, 水深 0.4m, 由于运行问题, 该系统后有一 400m 长浅沟, 随后大量这种湿地在荷兰建成。

Dr. Seidel 的工作也刺激了德国在这方面的研究 (1978)。在 60 年代中期, Dr. Seidel 与 Dr. Kickuth 合作并由 Dr. Kickuth 在 60 年代中期开发了 “根区法” (RZM), 此根区法由一种有芦苇的矩形池子组成。土壤经选择含有钙, 铁, 铝添加剂, 以改善土壤结构和对 P 的沉淀性能。水以地下潜流水平流过芦苇根。污水流过芦苇床时, 有机物降解, N 被硝化反硝化, P 与 Ca, Fe, Al 共沉积于土壤中。水面保持在地面水平, 在池子进口、出口进行布水和收集。此法问题在于土壤渗透能力并非象 Dr. Kickuth 预测随时间而增大, 且芦苇传氧至根的能力也通常被认为比 Dr. Kickuth 声称的要少 (1990)<sup>[7]</sup>。

在北美, 由于观察到自然湿地的同化能力, 而在 70 年代开始对不同设计的人工湿地进行实验。大部分初期工作都使用自然湿地处理污水, 不久就暴露出应用自然处理系统处理污水会导致种类组成、种群结构、功能及湿地总体价值的显著变化, 并意识到人工湿地具有应用的巨大潜力。因人工湿地不影响自然湿地价值, 且可对处理工艺优化控制。

欧洲的早期工作对美国人工湿地技术产生了影响。在 60 年代末, 美国 NASA 的国家空间技术实验室研究开发了一种 “采用厌氧微生物和芦苇处理污水的复合系统”。1976 年美国 NASA 出版了一本题为 “充分利用水生植物” 的书。在其中描述了欧洲系统及早期 NASA 系统。NASA 的砾石床系统在去除 BOD、SS、大肠菌及氮方面非常有效, 北美的其他国家也进行了一些开拓性工作。

### 3 国外湿地技术

#### 3.1 国外湿地技术应用现状

自由表面流湿地在欧洲发展缓慢。最近在瑞典建了一座处理 6500PE, 占地 22 公顷的自由表面流湿地 (Wittgren 1994)。在北美自由表面流湿地是主要处理湿地。其 200 座湿地处理系统有 2/3 是自由表面流湿地, 其中一半又是自然湿地 (Knight, 1993)。自然湿地的大小从 1~1000 公顷, 其中一半在 10~100 公顷。人工自由表面流湿地通常较小, 60% 小于 10 公顷。自然湿地水力负荷小于人工湿地。系统水深范围 5~90cm, 30~40cm 较普及。最常用的预处理是兼性或氧化塘。表明许多湿地系统用于现行塘系统的精处理<sup>[8]</sup>。

地下潜流系统在欧洲应用较多, 有几百座。在丹麦、德国、英国每个国家都至少有 200 个系统在运行。此技术还在快速发展, 特别在一些东欧国家。绝大多数系统种植有芦苇, 也有种植其它湿地植物。在德国大多数系统介质是土壤。人们认为根的生长和芦苇根区会增加和稳定导水性。但几乎所有土壤系统都遇到表面短流问题。为保证潜流, 英国和北美绝大多数采用砾石床。虽有些砾石床也堵塞, 但主要是预处理不足。在欧洲, 此类系统趋向对近 1000PE 的乡村级社区进行二级处理。北美则趋向更多人口的高级处理。在澳大利亚和南非则用于处理各类废水。

#### 3.2 国外湿地系统的运行效果

根据对 104 座潜流系统和 70 座自由水面系统的运行数据统计, 结果如下:

SS: 两种人工湿地皆可有效去除 SS。用于高级处理时, 出水 < 20mg/L, 用于二级处理时, 较高但通常 < 20mg/L, 浓度较高时往往是由于系统中开放水面的浮游生物所致。

潜流湿地平均进水 140mg/L, 平均出水 24mg/L。

表面流湿地平均进水 49mg/L, 出水 17mg/L。

BOD: 进水由于不同处理目标变化很大, 出水小于 20mg/L 在两种湿地中都易达到。一般潜流系统 BOD 平均进水 114mg/L 时, 平均出水 17mg/L。表面流系统平均进水 41mg/L, 平均出水 11mg/L。

P: 许多自由表面流湿地主要目标在于除 P, 而潜流系统用于除去 BOD 和 SS。从两种系统的运行可以反映出绝大多数表面流系统 TP 出水 < 1mg/L, 而潜流系统则有变化。人工湿地除 P 主要是由于吸附、络和及与 Ca、Al、Fe 和土壤颗粒的沉淀反应及泥炭累积, 其中泥炭累积是最可持续的工艺。

N: 人工湿地的脱氮机理主要是硝化反硝化。硝化所需氧或直接从大气扩散至水中或沉淀表面, 或由植物根释放。氧化常是脱氮的限制步骤。因此, 湿地的设计, 废水的类型、组成也影响脱氮。N 也被植物吸收或合成生物体。潜流系统中脱氮效率在 30% ~ 40% 间, 表面流系统(低负荷)大于 50%。

### 3.3 国外湿地系统的发展趋势

各种不同的湿地在世界各地已被用来处理大量不同的废水。气候条件、湿地的规模、负荷率、几何布置、植物种类构成及废水的类型构成各地变化很大。美国 EPA 目前正在开发北美人工湿地数据库, 地方数据库在其他国家已存在。为减少重复劳动和改良经验湿地设计方法, 所有这些数据都应通过公共数据库使世界各地的工程师和科技人员能够获得。这样的数据库将是非常有用的工具。它可尽量减少建设低效湿地的风险。两种湿地的设计指南现已出版。但改良工作仍然需要。有必要更细致地研究不同地区特征和运行数据以便在将来的建设中提供更合理的参数。

竖流湿地在欧洲许多地方投入运行已有几十年。竖流系统至今未广泛使用是因其需要更细致的建设和介质选择。最近国际会议中有几篇文章对竖流系统评价很高。

目前世界上人们正在投入大量精力以改良人工湿地技术。潜流系统的处理效率可通过选择竖流系统, 采用间歇负荷和合理选用介质获得提高。还可引入一些传统处理技术的理论, 如回流。此外, 不仅对竖流系统, 对所有人工湿地系统都需深入研究以改良和优化工程设计参数, 还需对系统的长期运行能力和管理问题进行研究。人工湿地不仅可以用于城市和各种工业废水的二级处理, 还可用于高级处理中的精处理和对农田径流的处理。在有些情况下, 人工湿地可能是唯一适用技术<sup>12</sup>。

## 4 人工湿地技术在我国的应用研究

我国在“七五”期间开始人工湿地的研究。首例采用人工湿地处理污水的研究工作始于 1988 ~ 1990 年在北京昌平进行的自由水面流人工湿地。处理量为 500t/d 的生活污水和工业废水, 占地 2ha, 水力负荷 4.7cm/d, HRT: 4.3d, BOD 负荷: 59kgBOD<sub>5</sub>/ha. d. 处理水解池出水或原污水。去除效果见表 1。

表 1 北京昌平人工湿地污水处理效果

项目	(mg/L)						
	COD	BOD <sub>5</sub>	TOC	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP
进水	547	125	76.7	275	14.4	4.8	0.94
出水	103	17.8	28.2	17	5.1	1.95	0.42
去除率%	81.2	85.8	63.2	93.8	64.6	59.4	55.1

1990 年, 国家环保局华南环境研究所与深圳东深供水局在深圳白泥坑建立实验基地, 占地 8400m<sup>2</sup>, 处理 3100t/d 的城镇综合污水。

1989 ~ 1990 年, 天津环保研究所建立 11 个实验单元研究芦苇湿地对城市污水的处理能力, 并对水力负荷, 有机负荷, 停留时间及季节等与污水中主要污染物间规律进行探索。结果优于二级处理标准, 有较高且稳定的脱 N 除 P 效果, 季节性差异较小。

华中农业大学李科德等采用人工模拟芦苇床处理生活污水, 对其净化机理进行了研究。结果表明, 芦苇根际具有较高的氧化还原电势, 为好氧微生物的活动创造了有利条件。芦苇床内根际微生物数量与污染物去除率之间有明显相关性。污水中有机污染物是通过芦苇床内各种微生物协同作用

而去除;  $\text{NH}_3\text{-N}$  主要是通过硝化反硝化连续反应去除; 总大肠菌群的去, 一方面是原生动物的捕食作用和某些放线菌产生的拮抗作用, 另一方面是受营养、温度、pH 的影响。SS 和  $\text{PO}_4\text{-P}$  的去除主要通过沉淀、过滤、吸附、固结等理化作用而实现。芦苇床的优势菌属: 假单胞菌属、产碱杆菌属、黄杆菌属, 原生动物以肾形虫居多<sup>[9]</sup>。

中国环境科学院刘文祥在 1994-06~1995-08, 采用由漂浮植物、沉水植物、挺水植物及草滤带组成的人工湿地对控制农田径流污染进行了研究。占地 1257m<sup>2</sup>, 利用低洼弃耕地改造而成。设计停留时间 1~5d。处理结果: 平均去除率, TN, 35.5%; TP, 24.4%; TDP, 9.8%; TDN, 41.2%; SS, 49.9%; COD<sub>Cr</sub>, 6.4%。总投资 2.3 万元, 运行时, 仅需要一般性管理, 运行费极少。

中科院南京植物所采用人工湿地系统处理酸性铁矿废水, 面积 130m<sup>2</sup>, 流量 0.5m<sup>3</sup>/h, 运行两个月表明: pH 由 2.6 升到 6.1, 铜离子去除 99.7%, 铁离子去除 99.8%, 锰离子去除 70.9%, 每年运行费 5~10 万元<sup>[10]</sup>。

山东胶南市在建一日处理 6 万吨人工湿地系统, 占地 1000 亩, 工艺为: 格栅-沉砂池-调节池-人工湿地-排海。1997 年底除沉砂调节池外, 都已建成。此系统利用海边盐碱地, 投资三千万元。

## 5 人工湿地系统在我国的应用前景

目前, 我国绝大部分城市污水厂均采用传统的二级活性污泥法处理工艺。这种工艺工程投资高, 耗能大, 运行管理要求高, 对控制大城市的水环境污染起到了关键作用。然而由于我国经济发展水平不高, 能源短缺, 许多地方, 尤其中小城市和乡村缺乏具有一定操作管理和技术水平的人员。同时我国的乡镇企业迅猛发展, 对当地造成了严重的环境污染。因此在我国大力开发具有高效、简易、低耗的污水处理技术, 具有很大意义。人工湿地系统是一个完整的生态系统。它形成了内部的良好循环并具有较好的经济效益和生态效益, 是正在不断得到研究应用和发展的污水处理实用新技术, 具有投资低, 出水水质好、抗冲击力强、增加绿地面积、改善和美化生态环境、操作简单、维护和运行费用低廉等优点。这项技术适合我国国情, 尤其适合广大农村, 中小城市的污水处理, 具有极其广阔的应用前景。国内对这项技术的研究应用尚处于起步阶段。有关工艺设计资料和应用实例还不多见, 有待结合我国不同地区的具体情况, 深入开展研究工作, 取得适合于不同地区, 不同环境气候条件及不同污水特性的实用数据, 以促进其在我国适当地区的推广应用。

## 参 考 文 献:

- [1] 杨朝飞. 中国湿地现状及其保护对策[J]. 中国环境科学, 1995, (6): 407-411.
- [2] Hans Brix. Use of constructed wetland in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives[J]. Wat. Sci. Tech., 1994, 30(8): 209-223.
- [3] Hammer, D. A.. General principles. constructed wetland for wastewater treatment[M]. Lewis Publishers, 1989.
- [4] Cooper, P. F. and Boon, A. G.. The use of phragmites for wastewater treatment by the root zone method. The DK approach. In Reddy, K. R. and Smith, W. H.(eds.) Aquatic plants for water treatment and resource recovery[J]. Magnolia Publishing Orlando, 1987. 153-174.
- [5] Seidel, K.. Abbau von bacterium coli durch höhere wasserpflanzen[J]. Naturwiss., 1964, 51, 395.
- [6] Seidel, K.. Reinigung von Gewässern durch höhere pflanzen[J]. Naturwiss., 1966, 53, 289-297.
- [7] Seidel, K.. Happel, H. and Grane, G. Contributions to revitalisation of waters 2nd edn., Stiftung Limnologische Arbeitsgruppe Dr. Seidel e. V., Krefeld(Germany), 1978. 1-62.
- [8] Knight, R. L., Ruble, R. W., Kadlec, R. H. and Reed, S. Wetlands for wastewater treatment: performance database in Moshiri, G. A. (ed.) Constructed wetlands for water quality improvement[J]. Lewis Publishers, Boca Raton, 1993. 35-58.
- [9] 李科德. 芦苇床系统净化污水的机理[J]. 中国环境科学, 1995, (2): 140-144.
- [10] 唐述虞. 铁矿废水的人工湿地处理[J]. 环境工程, 1996, (4): 3-7.
- [11] 沈耀良. 新型废水处理技术——人工湿地[J]. 污染防治技术, 1996, (1-2): 1-8.