

人工湿地生态系统污水净化研究进展

张虎成 田 卫 俞穆清 徐 宁

(中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

摘 要 人工湿地作为近 20 年来发展起来的一种传统污水处理技术的一种廉价的替代方案, 越来越受到世界各国的普遍重视。在分析中, 详细介绍了人工湿地的概念、组成、基本的结构设计类型及其在污水净化中的应用领域和应用前景, 同时详细论述了影响人工湿地污水净化效率的各种影响因素和制约条件及其各种影响因素之间的相互关系, 并对今后研究的方向进行了展望, 为人工湿地污水净化技术的应用研究提供了有益的参考。

关键词 人工湿地 污水净化

Study progress in constructed wetland ecosystems for sewage purification

Zhang Hucheng Tian Wei Yu Muqing Xu Ning

(Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012)

Abstract As a low cost alternative to traditional sewage purification, the technology of constructed wetlands has been developed in recent 20 years and many countries have paid more attention to it. This paper provided a detailed review on the definition, composition, design, application of constructed wetlands. At the same time, the paper specified various factors and restrain conditions affecting purification efficiency and discussed the interrelations among them. Meanwhile, the paper gave the prospects of constructed wetland research in the future.

Key words constructed wetlands; sewage purification

1 引 言

湿地被应用于污水净化始于 20 世纪 50 年代^[1], 而用人工湿地进行污水净化的研究始于 20 世纪 70 年代末^[2]。人工湿地是一个自适应的系统, 它是近 20 年发展起来的一种废水处理新技术, 其特点是投资省, 处理效果好, 运行维护方便, 它属于一种生态治理污水的方法, 可作为传统的污水处理技术的一种有效替代方案, 这对于节省资金、保护水环境以及进行有效的生态恢复具有十分重要的现实意义, 也越来越受到世界各国的重视和关注^[3]。目前它被广泛应用于处理生活污水^[4]、工业废水^[5]、矿山及石油开采废水^[6,7]、农业点源污染和面源污染^[8~10]以及水体富营养化问题的治理^[11]。人工湿地比天然湿地污水处理提供了更好的机会, 因为人工湿地部分采取了人为控制措施, 从而可以优化系统去除 BOD、COD、营养元素和细菌性污染物的性能。它不仅可以为昆虫和其他动物提供生境, 也可以作为一种美学景观, 而且可以最大限度地进行水力条件的控制和湿地植物的管理。

2 人工湿地的概念、分类、结构组成及基本的设计类型

2.1 人工湿地的概念

美国著名的湿地研究、设计与管理专家 Hammer 等人^[12]将人工湿地定义为: 一个为了人类的利用和利益, 通过模拟自然湿地, 人为设计与建造的由饱和和基质、挺水与沉水植被、动物和水体组成的复合体。夏汉平等^[13]认为, 人工湿地是指通过模拟天然湿地的结构与功能, 选择一定的地理位置与地形, 根据人们的需要人为设计与建造的湿地。除此之外, 人工湿地的叫法也较多, 如 man-made wetland, engineered wetland, created wetland, artificial wetland, constructed wetland 等, 当首届国际人工湿地处理污水大会于 1988 年在美国召开后, constructed wetland 才开

资助项目: 中国科学院东北地理与农业生态研究所学科前沿资助项目 (KZCX3-SW-NA-13)

收稿日期: 2003-03-31; 修订日期: 2003-06-28

作者简介: 张虎成(1974~), 男, 博士研究生, 主要从事环境污染防治及评价研究。

始逐渐取代上述其他术语而成为人工湿地的通用名词。

2.2 人工湿地的分类

人工湿地至少可分为4大类^[14]: 人工生境湿地,协助天然湿地用于生物多样性的保护; 人工抗洪湿地,用于控制洪水或泄洪; 人工水产湿地,用于农业生产与水产养殖; 人工处理湿地,用于污水污物处理。目前提及的人工湿地污水净化系统通常是指处理湿地。

2.3 结构组成和结构类型

水体、基质、水生湿生植物和微生物是构成人工湿地污水处理系统的4个基本要素。湿地净化污水是湿地中基质、植物和微生物相互关联,物理、化学和生物过程协同作用的结果^[13]。

目前人工湿地污水处理系统的结构设计类型按污水的流动方式可以分为3种:表面流人工湿地(SFW)、潜流人工湿地(SFS)^[15]和垂直流人工湿地(VCW)^[16]。其他设计类型大都是以此为基础,进行必要的改进或复合而产生的。

表面流人工湿地系统中,废水在湿地的土壤表层流动,水深较浅(一般在0.1~0.6 m)。与潜流人工湿地系统相比,其优点是投资省,缺点是负荷低,北方地区冬季表面会结冰,夏季会滋生蚊蝇,散发臭味。潜流人工湿地系统,污水在湿地床的表面下流动,一方面可以充分利用填料截留等作用,提高处理效果和处理能力;另一方面由于水流在地表以下流动,保湿性较好,处理效果受气候影响较小,占地较小,且卫生条件较好,建设成本较高,是目前欧洲国家大多采用的一种设计类型。而与水平流系统对污水中营养物质的去除效果相比,由 Seidel 首次设计的垂直流人工湿地系统具有更大的优越性^[17]。

3 人工湿地的去污机理及影响处理效率的主要因素

3.1 人工湿地的去污机理

人工湿地对污水的处理有十分复杂的净化机理。一般认为,人工湿地生态系统是通过物理、化学及生化反应三重协同作用净化污水^[13,15]。其中物理作用主要是过滤、沉积作用,污水进入湿地,经过基质层及密集的植物茎叶和根系,可以过滤、截留污水中的悬浮物,并沉积在基质中;化学反应主要指化学沉淀、吸附、离子交换、拮抗和氧化还原反应等,这些化学反应的发生主要取决于所选择的基质类型;

生化反应主要指微生物在好氧、兼氧及厌氧状态下,通过开环、断键分解成简单分子、小分子等作用,实现对污染物的降解和去除^[18]。其中构成人工湿地的4个基本要素都具有单独的净化污水能力^[19~21],尤其是人工湿地基质中微生物类群在人工湿地污水净化过程中起到极其重要的作用。

3.2 人工湿地净化污水的关键要素

3.2.1 湿地植物

人工湿地成熟以后,当污水进入湿地,经过基质层及密集的植物茎叶和根系,可以过滤、截留污水中的悬浮物。同时湿地中的植物能够从废水中吸收营养物质作为自身生长所需的营养源而去除污染物^[17]。其次,根据德国学者 Kickuth R. 的根区法理论,由于生长在湿地中的挺水植物对氧的输送、释放、扩散作用,将空气中的氧转运到根部,再经过植物根部的扩散,在植物根须周围环境中依次出现好氧区、兼氧区和厌氧区,有利于硝化、反硝化反应和微生物对磷的过量积累作用,达到除氮、磷等污染物的效果。在湿地植物的选择上,芦苇床技术应用较普遍,应用范围也较广^[22]。有研究表明,植物的存在有利于系统中硝化作用的发生,有植物系统的人工湿地总氮(TN)的去除率明显高于无植物系统,有植物系统对凯氏氮、氨氮、尤其是亚硝态氮的去除效果明显优于无植物系统^[17]。张甲耀等人^[19]对不同植物的去氮效果进行了研究,潜流型人工湿地污水处理系统对总氮(TN)的去除率分别为:芦苇系统49.34%、茭白系统45.49%、无植物系统38.69%,这说明不同的植物具有不同的去污效果。还有研究表明,植物须根系比根状茎、匍匐茎等具有更好的污水净化效果^[16]。阳承胜等人^[23]通过对宽叶香蒲、芦苇、茭苳和狗牙根的研究发现,这4种植物都具有较强的吸收和富集重金属的能力,且主要富集在植物的地下部分,茭苳富集重金属能力最强,宽叶香蒲相对较弱。重金属在植物体内不同器官中分布且各重金属元素在被测的4种植物体内的分布呈现一致性的规律性,即根>凋落物>地下茎>地上茎>叶,重金属主要富集在植物根部和地下茎部,以Pb最为典型。还有研究表明^[24],在人工湿地的沉积物和植物中,金属浓度比天然湿地中的高,且对于大多数金属来说,Mn、Zn、Cu、Ni、B和Cr等元素可以被湿地植物所积累。因而通过人工湿地系统植物吸收-收割去除的途径去除污水中的重金属污染物,很可能是传统污水处理的有效替代方案。但值得一提的是,从

湿地收获的植物可否作为饲料,或家畜对这些从人工湿地中收获的植物能否接受,以及如何处理利用这些植物是一个值得研究的问题。

3.2.2 湿地基质

人工湿地基质主要由土壤、砂和卵石等组成。土壤往往被看成是高效的“活过滤器”,它的净化功能主要由下列要素组成^[15]:绿色植物根系的吸收、转化、降解和生物合成作用;土壤中的细菌、真菌和放线菌等微生物的降解、转化和生物的固定化作用;土壤的有机、无机胶体及其复合体的吸收、络合和沉淀作用;土壤的离子交换作用;土壤和植物的机械阻留作用;土壤的气体扩散作用。土壤的净化能力受气候和其他环境条件的影响,在温暖的植物生长季节,对生物可降解的有机污染物,上述要素中、、项起主要作用;对无机盐类、营养元素和重金属等污染物,、项起重要作用;对那些易挥发的或者可以转化为气态污染物的,则项起主导作用。还有研究认为含有机质丰富的基质有助于吸附各种污染物,如含 CaCO_3 较多的石灰石有助于磷的去除^[18]。湿地基质土壤的物理性能至关重要,一般要求土壤质地为粘土土壤,渗透性为慢中性,土壤渗透率为 $0.025 \sim 0.35 \text{ cm/h}$ 为宜。其次土壤的氧化还原电位 E_h 也是影响污水处理效果的重要因素之一^[25,26]。湿地的一个重要特征是存在好氧与厌氧界面,从而使土体内的氧化还原电位 E_h 变幅高达 1000 mV ($-300 \sim 700 \text{ mV}$),从而直接或间接地影响湿地去污效果^[27]。土壤的化学性质针对不同的植物有不同的要求,如芦苇需要土壤 pH 值为 $6.5 \sim 8$;对耐盐碱也有极限,土体中 $\text{Cl}^- < 1\%$; $\text{CO}_2 < 2\% \sim 5\%$ (土壤重量比)。此外,Ca 的含量过高影响 K 的吸收,妨碍芦苇的生长,K/Ca 临界值最好大于 29^[15]。

3.2.3 湿地微生物种群

研究表明,人工湿地基质中微生物种群在人工湿地污水净化过程中起着极其重要的作用,主要的生物化学反应大多是在微生物和酶的作用下进行的。人工湿地中的微生物极其丰富,这为人工湿地污水处理系统提供了足够的分解者,研究发现,芦苇床系统的根表面根际土的细菌数量可达 10^8 个/g (干重),且趋于稳定,季节变化不大^[28]。还有研究表明,不同的湿地类型中具有不同的优势菌属^[29]:人工芦苇湿地系统中的优势菌属主要有 3 种,它们分别是假单胞杆菌属 (*pseudomonas*)、产碱杆菌属

(*alcaligenes*) 及黄杆菌属 (*flavobacterium*),与天然的芦苇床相比,人工床中的优势微生物组成与其基本相等。上述几种优势菌属均为快速生长微生物,而且其体内大多含有降解质粒,因而它们是废水中有机物分解的主要微生物种群。微生物对污水中的主要特征污染物具有显著的去除效果,如 N 的去除主要通过硝化和反硝化过程,大多数人工湿地处于一种厌氧状态,所以反硝化过程是 N 去除的主要途径之一。而反硝化过程 ($\text{NO}_3^- - \text{NO}_2^- - \text{NO} - \text{N}_2\text{O} - \text{N}_2$) 是一个连续的酶促反应^[30],所以在 N 的去除作用中微生物起了很重要的作用。梁葳等人^[31]研究认为,微生物作用是污水中的凯氏 N 以及 COD 去除的主要途径,而磷细菌的数量也与磷的去除率呈明显的正相关^[28]。还有研究表明,微生物的活性受各种因素的影响:V. J. Shackle 等人^[32]研究了在人工湿地中酶活性的碳的供应和调节作用,通过对 -葡萄糖苷酶、磷酸酯酶和硫酸酯酶与碳供应关系的研究,认为不同的酶活性受不同形态碳的影响。当湿地中碳过量时,N 和 P 就可能成为微生物增长的限制因子。微生物活性还受到其他有害因子的干扰,已有研究表明,除草剂和难降解高分子化合物可显著降低反硝化微生物的除氮能力^[33], Cr^{3+} 、 Cr^{6+} 对反硝化作用也有抑制作用^[34,35]。

4 研究方法与应用前景展望

4.1 研究方法

目前,人工湿地的研究涉及的学科和理论较多,如系统反应动力学、系统水文学和土壤学等。正如像其他生物废水处理一样,人工湿地对污染物的去除效率也具有不稳定性,Bastian 等人^[36]于 1993 年整理了北美人工湿地系统对各种典型污染物的去除效率,显示了这种去除效果的可变性:人工湿地对有机物的去除率范围为 $50\% \sim 90\%$;固体悬浮物的去除率范围为 $40\% \sim 94\%$;氮的去除率范围为 $30\% \sim 98\%$;磷的去除率范围为 $20\% \sim 90\%$ 。正因为这种可变性,所以对于人工湿地的应用和设计通常应先进行小试模拟,在取得一定的应用参数和理论依据之后,再开始中试研究,才更符合实际情况。尤其要对人工湿地的水流流态、水力负荷和水力停留时间进行认真细致的模拟对比。人工湿地系统的反应动力学机制和水力学特征参数,可以借助于示踪剂的方法而获得^[37,38]。

4.2 人工湿地前沿研究领域及其发展趋势

人工湿地是一个综合的生态系统,它应用生态系统中物种共生、物质循环再生原理、结构与功能协调原则,在促进废水中污染物质良性循环的前提下,充分发挥资源的生产潜力,防止环境的再污染,获得污水处理与资源化的最佳效益,是一种较好的生态废水处理方式,比较适合于处理水量不大、水质变化较小、管理水平不高的城镇污水和较分散的污水的处理^[18]。经过20多年的研究,我国人工湿地污水净化技术的研究已经取得了许多经验参数和理论数据,但是还有许多工作有待于进一步开展:

(1) 实际应用中,人工湿地系统的工艺设计常常是与其他系统相结合,构成多水塘处理系统,共同实现污水净化的目标。目前最常见的多水塘组合是人工湿地与好氧塘、厌氧塘以及兼性塘进行多级串联组合,其目的是为了保证湿地处理系统具有更高的处理效率,使出水水质更趋稳定。但是其组合方式、组合次序都会影响到系统出水的水质,因此,与人工湿地组成的多水塘污水复合处理系统也将是今后的热点研究之一。

(2) 农业面源污染的研究和治理。目前,面源污染已经远远超过点源污染,用传统的点源污染控制技术很难治理面源的污染,而人工湿地在这方面具有很明显和独特的优势和潜力^[8],国外已有一部分人开始了这方面的应用研究,但在国内尚未见报道。

(3) 由于氮、磷等营养元素是水体营养化的主要原因,所以它们仍然是污染物中被严格控制的主要目标。因此,在研究去污机制的基础上,构建或调控有利于稳定地去除氮、磷等营养元素的湿地系统,仍是今后研究和实践的重要内容。

(4) 决定湿地处理效率的因素除了系统内污染物降解的反应动力学和湿地内部的水流流态外^[37],还有许多外在的因素如温度、进水负荷、水力停留时间、区域差异和气候特征以及系统设计类型等,它们都会对污水净化效果产生影响^[16,37,39]。而且,目前的研究没有一个统一的对比标准,人工湿地的类型和规模千差万别,诸多研究结果很大程度上都缺乏可比性。因此,系统地开展具有高对比性的研究也将成为今后研究的一个重要方向。

(5) 人工湿地生态系统在寒冷地区的运行状况及其在生态恢复中的应用。大量的研究表明,温度的降低会影响人工湿地污水净化的效率^[40]。因此,气候很可能成为设计人工湿地的一个限制性因子,

针对我国北方大部分寒冷地区与生态环境较差的地区,研究如何利用人工湿地特有的功能特性来改善和恢复恶化的生态环境具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] Jos T. A. Verhoeven, et al. Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations. *Ecological Engineering*, 1999, 12: 5 ~ 12
- [2] 杜中典,等. 污水人工湿地系统中有机物积累规律与堵塞机制的研究进展. *农业环境保护*, 2002, 21(5): 474 ~ 476
- [3] 诸惠昌,等. 新型废水处理工艺——人工湿地的设计方法. *环境科学*, 1993, 14(2): 39 ~ 43
- [4] Srinivasan, N., et al. Improvement of domestic wastewater quality by subsurface flow constructed wetlands. *Bioresource Technol.*, 2000, 75(1): 19 ~ 25
- [5] Miklas Scholz, et al. Performance comparison of experimental constructed wetlands with different filter media and macrophytes treating industrial wastewater contaminated with lead and copper. *Bioresource Technology*, 2002, 83: 71 ~ 79
- [6] Knight R. L. The use of treatment wetlands for petroleum industry effluents. *Environmental Science and Technology*, 1999, 33(7): 973 ~ 980
- [7] 籍国东,等. 自由表面流人工湿地处理超稠油废水. *环境科学*, 2001, 22(4): 95 ~ 99
- [8] B. C. Braskerud, et al. Factors affecting nitrogen retention in small constructed wetlands treating agricultural nonpoint source pollution. *Ecological Engineering*, 2002, 18: 351 ~ 370
- [9] Long M. Nguyen. Organic matter composition, microbial biomass and microbial activity in gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters. *Ecological Engineering*, 2000, 16: 199 ~ 221
- [10] Carsten Schulz, Carsten Schulz, et al. Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow. *Aquaculture*, 2003, 217: 207 ~ 221
- [11] Ying-Feng Lin, et al. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system. *Aquaculture*, 2002, 209: 169 ~ 184
- [12] Hammer, D. A. *Constructed wetlands for wastewater treatment*. Michigan: Lewis Publishers Inc., 1989, 5 ~ 20
- [13] 夏汉平,等. 人工湿地处理污水机理与效率. *生态学杂志*, 2002, 21(4): 51 ~ 59
- [14] Kadlec, H. R., et al. *Treatment wetlands*. FL: Lewis Publishers, 1996
- [15] 高拯民,等. *城市污水土地处理利用设计手册*. 北京: 中国标准出版社, 1990

- [16] 吴振斌,等. 垂直流人工湿地水学特点对污水净化效果的影响. 环境科学, 2001, 22(5):45~49
- [17] 贺锋,等. 复合构建湿地运行初期理化性质及氮的变化. 长江流域资源与环境, 2002, 11(3):279~283
- [18] 丁疆华,等. 人工湿地在处理污水中的应用. 农业环境保护, 2000, 19(5):320~封三
- [19] 张甲耀,等. 潜流型人工湿地污水处理系统氮去除及氮转化细菌的研究. 环境科学学报, 1999, 19(3):323~327
- [20] Hoppe H. G., et al. Microbial decomposition in aquatic environments: Combined processes of extra cellular activity and substrate uptake. Applied Environmental Microbiology, 1988, 54:784~790
- [21] 廖新伟,等. 香根草和风车草人工湿地对猪场废水氮磷处理效果的研究. 应用生态学报, 2002, 13(6):719~722
- [22] Cooper P. F., et al. Reed bed treatment systems for sewage treatment in the United Kingdom—The first 10 years' experience. Water Sci. Tech., 1995, 32(3):317~327
- [23] 阳承胜,等. 重金属在宽叶香蒲人工湿地系统中的分布与积累. 水处理技术, 2002, 28(2):101~104
- [24] P. A. Mays, et al. Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage. Ecological Engineering, 2001, (16):487~500
- [25] McLatchey, G. P., et al. Regulation of organic matter decomposition and nutrient release in a wetland soil. Journal of Environmental Quality, 1998, 27:1268~1275
- [26] Reddy, K. R., et al. Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands. Water Science and Technology, 1997, 35(5):1~10
- [27] Ann, Y., et al. Influence of redox potential on phosphorus solubility in chemically amended wetland organic soils. Ecological Engineering, 2000, 14:169~180
- [28] 李科得,等. 芦苇床系统净化污水的机理. 中国环境科学, 1995, 15(2):140~144
- [29] 沈耀良,等. 人工湿地系统的除污机理. 江苏环境科技, 1997, (3):1~6
- [30] Roger K., et al. Denitrification. Microbial Rev., 1982, (46):43~70
- [31] 梁葳,等. 构建湿地基质微生物与净化效果及相关分析. 中国环境科学, 2002, 22(3):282~285
- [32] V. J. Shackle. Carbon supply and the regulation of enzyme activity in constructed wetlands. Soil Biology & Biochemistry, 2000, (32):1935~1940
- [33] 黄正,等. Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 对人工湿地反硝化作用的影响. 环境科学, 2000, 21(4):110~112
- [34] Mazierski J. Effect of chromium(Cr^{6+}) on the growth rate of denitrifying bacteria. Water Res., 1994, (28):1981~1985
- [35] Harger S. C., et al. Chromium and nickel toxicity during the bio-treatment of high ammonia landfill leachate. Water Environ. Res., 1996, (68):19~24
- [36] Bastian, R. K., Hammer, D. A. The use of constructed wetlands for wastewater treatment and recycling. In: Moshiri, G. A. (Ed.). Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Lewis Publishers, Ann, Arbor, 1993. 59~68
- [37] 付贵萍,等. 垂直流人工湿地系统中水流规律的研究. 环境科学学报, 2001, 21(6):720~725
- [38] 刘文兵,等. 人工湿地床示踪剂的研究. 四川环境, 1995, 14(4):11~15
- [39] Jari Koskiah. Flow velocity retardation and sediment retention in two constructed wetland ponds. Ecological Engineering, 2003, 19:325~337
- [40] David Steer, et al. Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent. Ecological Engineering, 2002, 18:429~440