DOI:10.14026/j.cnki.0253-9705.2017.04.005

我国人工湿地污水处理系统的现状探析及展望*

Analysis and Prospects on the Situations of Constructed Wetlands in China

摘　要　人工湿地是一种生态污水处理工程系统，20世纪80年代后期被引入中国，随后其数量快速增长。人工湿地与传统污水处理厂相比，投资低、成本低、效率高，具有多重生态服务功能。本文分析了人工湿地污水处理效率、生态服务功能、湿地植物的再资源化利用以及人工湿地在我国发展的驱动力机制，提出了该技术的局限性、发展趋势及面临挑战。我国人工湿地污水处理系统的发展，应充分发挥政府“自上而下”管理和社会“自下而上”参与的双方面作用，同时加强对民众的科普宣传工作。

关键词　人工湿地；污水处理；去除率；生态服务功能；湿地植物

■文/刘冬　张慧泽　徐梦佳

引言

过去几十年里我国传统的污水处理方式主要是通过污水处理厂对污水进行处理。我国的城镇污水处理起步于20世纪70年代末。1978—2014年，我国城市污水处理厂由37座增加到1807座，污水日处理能力由64万立方米增加到13087万立方米，分别增长了48倍和204倍，城市生活污水处理率在这十几年时间里也由1978年的10.3%上升到2014年的90.18%，这在一定程度上改善了我国的地表水环境，尤其是城市水环境质量。然而，目前我国运行的污水处理厂却存在着较严重的运营维护问题，在全国已建成的一千多座污水处理厂中，仅有约1/3按设计正常运行，约1/3低负荷运行，还有1/3间断性运行或者根本不运行，运行维护成本高是造成这一现象的主要原因。因此，处理效率高且运行维护成本低的污水处理方式——人工湿地受到开始受到广泛关注。

人工湿地的定义分为广义和狭义两种。根据国际重要湿地公约，广义的人工湿地包括人工处理湿地、储水区域以及排水沟、盐业用地、季节性被淹的农田、水产业池塘（鱼和虾）、灌溉地（水稻田）。本文采用其狭义定义，即人工湿地特指“人工处理湿地”。人工处理湿地系统是模拟自然湿地生态系统的物理、化学、生物作用而由人工建造和控制运行的，主要利用土壤、人工介质、植物、微生物的协同作用处理污水的生态工程技术。

人工湿地的研究可追溯到20世纪50年代，人们在意识到天然湿地具有调节径流、改善气候、美化环境等多方面的重要作用后，开始对天然湿地进行改造研究。1972年，德国学者Seidel与Kickuth合作提出了根区理论，首次揭示了高等植物在湿地污水处理系统中的作用，认为湿地净化去除污染物的主要作用过程发生在植物的根区部位，通过根区微生物的硝化、反硝化和吸附作用可有效去除氮、磷等营养元素。由此，欧洲开始了大量人工湿地的研究与应用。据统计，目前欧洲至少有6000个运行的人工湿地系统。此外，美国、新西兰、澳大利亚等也建造了大量人工湿地系统，近十几年来，亚洲、非洲的一些发展中国家也开始建造和应用人工湿地污水处理系统。我国从20世纪80年代后半期引入人工湿地并开始其相关的研究工作。1990年7月，深圳建立的白泥坑人工湿地可以看作是人工湿地在我国的首次大规模应用实践。随后，杭州、武汉、沈阳、北京、成都、昆明等市也相继建立了人工湿地污水处理

*基金项目：国家自然科学基金项目“人工湿地植物生物质发电利用的环境效应研究”（41501596）

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 污水处理厂和人工湿地的去除效果对比

水质指标	入水/(毫克/升)		出水/(毫克/升)		去除率/%	
	污水处理厂	人工湿地	污水处理厂	人工湿地	污水处理厂	人工湿地
NH_4^+-N	33.0 (3.6)	14.6 (12.5)	13.1 (1.9)	5.9 (5.4)	30	59.8
TN	30.4 (3.6)	24.1 (21.4)	17.3 (1.7)	13.4 (15.8)	30.1	44.3
TP	3.5	2.9 (1.6)	2	1.1 (1.0)	40	62.1
BOD_5	191 (19.0)	113 (109.7)	38.8 (11.1)	20.6 (26.1)	83.9	81.8
COD	370.2 (29.3)	234.7 (236.8)	84.9 (9.0)	62.5 (67.8)	77.9	73.4

注：进出水数据以平均值表示，括号里显示标准误。

系统示范工程。截至2009年，我国至少有200个运行正常的大规模人工湿地。

人工湿地具有较高的处理效率

根据水流型的不同，人工湿地污水处理系统可分为表面流人工湿地和潜流型人工湿地。表面流人工湿地与自然湿地类似，污水从湿地表面漫流而过，这类人工湿地结构较简单，工程造价较低，但占地面积较大、污水去除能力有限；且由于污水在填料表面漫流，易滋生蚊蝇，易对周围环境会产生不良影响。潜流型人工湿地中，污水从湿地一端进入填料床后通过水平潜流或垂直潜流的方式在填料缝隙之间渗流，可充分利用填料表面、丰富的植物根系及植物根系上生物膜等的吸附和截留作用，达到较高的氮、磷去除效果；另一方面，由于水流在湿地表面以下流动，处理效果受气候波动影响小，较干燥的生境可供中生植物的生长，卫生条件较好。近年来，依据不同污水处理目的，研发出了复合型人工湿地，即将一个或多个表面流人工湿地与一个或多个潜流型人工湿地以串联或并联的方式连接起来运行，有利于硝化和反硝化作用的发生，达到更好的氮去除效果。

通过文献、研究报告、网络等途径的数据搜索，本文研究分析了我国50个污水处理厂和202个人工湿地的进出水数据，结果发现，人工湿地的氨氮（NH_4^+-N）、总氮（TN）、总磷（TP）、化学需氧量（COD）和生物需氧量（BOD_5）的平均去除率分别为59.8%、44.3%、62.1%、73.4%和81.8%（表1），而污水污水处理厂相应的平均处理效率为30%、30.1%、40%、77.9%和83.9%，在氮、磷的去除方面人工湿地比污水处理厂具有优势。

人工湿地具有多重生态服务功能

人工湿地的主要设计目的是对污水进行净化，此外，人工湿地还能提供多重生态服务功能。人工湿地能吸收二氧化碳释放氧气调节区域微气候，通过植物生物量生产固碳，阻滞沙尘、降低噪声。人工湿地系统在污水净化工程中促进植物的生长，增加绿化面积，并能为动植物提供栖息地，有利于生物多样性的保护。人工湿地在处理城市公园、绿地景观水、河湖滨岸带等地表水质的同时，还能为人们提供更舒适的生活环境和教育娱乐用途等，具有显著的社会、环境和经济效益。

自然湿地虽也具有固碳、教育及娱乐等功能，但比起污水处理厂、人工湿地而言，其污水处理能力明显较低。而污水处理厂虽然具有一定的污水处理能力，但却不具备上述其他的生态服务功能（图1）。人工湿地系统不仅可以作为一种可持续的景观生态系统，还可以达到处理污水的目的，充分发挥湿地植物的多重生态功能，在人地矛盾紧张的中国无疑是一种值得大范围推广的污水处理发展模式。

人工湿地的植物再资源化利用

人工湿地植物是其污水处理的核心，在人工湿地污水处理过程中起着重要作用，主要包括直接吸收氮、磷等污染物，通过根系输氧促进根区的氧化还原反应与好氧微生物活动，以及增强和维持介质的水力传输等。人工湿地中种植的植物

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

人工湿地的主要设计目的是对污水进行净化，此外，人工湿地还能提供多重生态服务功能。

类型主要有四种：浮叶植物（如睡莲等），漂浮植物（如凤眼蓝等），挺水植物（如芦苇等），沉水植物（如金鱼藻等）。目前，挺水植物被广泛用于人工湿地污水处理系统。

国内外对人工湿地植物的研究多集中在植物吸收氮效率、植物与微生物作用机制机理、植物选种配置等方面。事实上，人工湿地植物不但可以去除废水污染物，还可直接吸收利用污水中可利用态的氮、磷等营养物质，供其正常生长，以达到促进废水中营养物质循环和再利用的目的，而此项研究一直被人们忽视。目前我国实际运行的人工湿地中，植物被收割后普遍没有得到妥善处置，造成了资源浪费和二次污染等问题。如把这部分植物收集起来，用做生物质能原料便可实现人工湿地系统的再资源化利用，同时还有可能解决传统生物质发电的原料供应与农作物争地的矛盾问题。从理论上讲，人工湿地植物有与玉米秸秆等相近的热值，具有较高的纤维素含量和较低的木质素含量，可以通过沼气发酵、燃料乙醇技术、生物质固体成型燃料技术等加以利用，成为一种较具潜力的生物质能源原料。但在实际运用中还有很多问题尚需进一步研究，如人工湿地运行处理效果、生物量生产及其能源转化技术的协调性等。

中国人工湿地发展的驱动力

我国传统的污水处理管理方式多采取“自上而下”的管理模式即由中央、地方政府拨款进行建造，然而这种管理形式对于人工湿地的应用推广效果并不理想。一些政府建设的人工湿地由于不恰当的运输和管理模式甚至不能维持良好运行，究其原因多在于公众和社会团体对人工湿地认知较少，导致人工湿地污水处理系统存在不负责任和义务脱节的“公地的悲剧”。随着近年来污水处理市场化运作PPP新模式的出现，可以通过配套融资政策弥补该行业重资产运营模式的短板，这种“自下而上”的驱动机制正慢慢成为政府投资引导之外的另一重要发展驱动力。同时，随着科学技术的发展、网络大数据的普及应用，以及人们环保意识的提升，人们越来越关注人工湿地污水处理技术的发展，特别是我国大部分地区土地资源都较为紧张的情况下，公众更期待人工湿地的高处理运行功能和多重的生态系统服务功能。这种由社会力量“自下而上”的驱动将能使人工湿地的效率发挥最大化。因此，在环境政策管理方面迫切需要加强公众、社会机构、当地

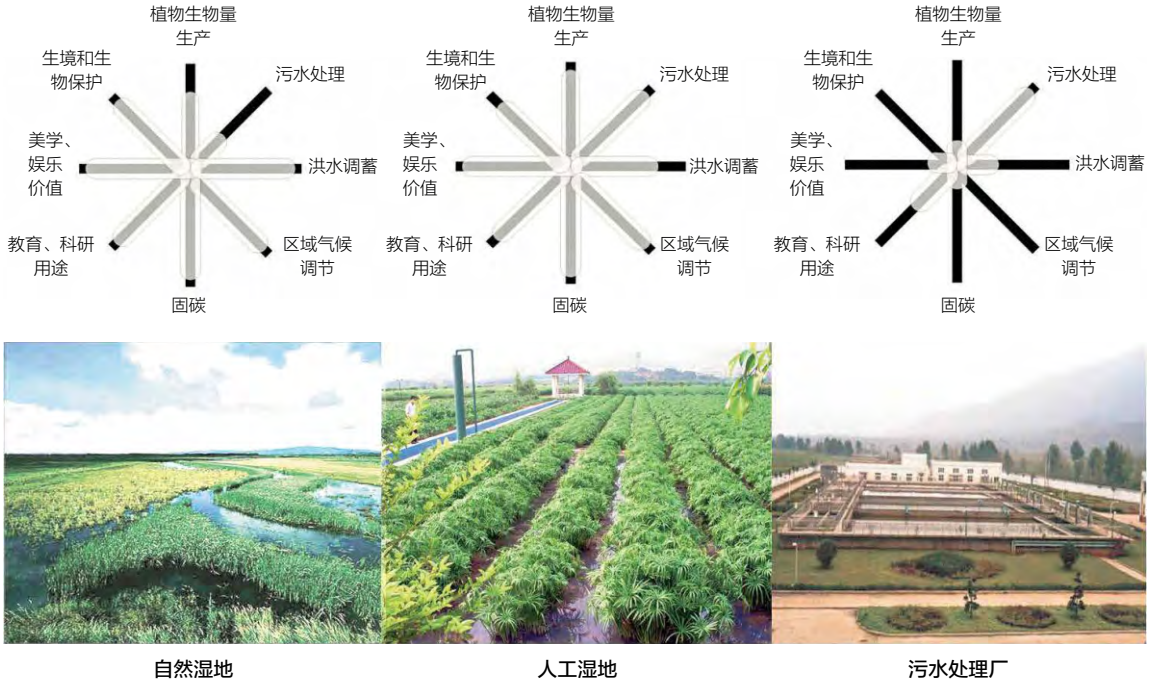

图1　自然湿地、人工湿地、污水处理厂的生态系统服务功能

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

> 人工湿地系统不仅可以作为一种可持续的景观生态系统，还可以达到处理污水的目的

企业等的“刺激”驱动作用，共同来实现维护污水处理设施的良好运转。

未来展望及挑战

在过去的20年里，我国多个省份建立了大量人工湿地，但与中国的污水产生量相比，目前的人工湿地数量和规模还远远不够，有关处理技术的研究也需不断拓展。未来随着我国污水产生量的不断增长，人工湿地技术可与其他处理方法相结合来形成新的污水处理模式和措施。如在我国大多数城市，废水处理系统和暴雨收集系统是共用的，尽管暴雨中污染物因子（总氮、总磷和有机物）浓度比废水中要低，但暴雨较大的径流量需要更大的处理面积，尤其在雨季，在污水处理厂数量规模有限且处理低浓度污染物效率较低的情况下，人工湿地系统可作为它的有效补充来处理暴雨污水。另外，针对大多数地区普遍存在的污水处理厂处理后的排放水浓度未能满足地表水Ⅲ类标准的现象，可在污水处理厂尾部构建人工湿地，从而将废水进行深度处理后再排入外界水体，以防止进一步造成水体污染。

人工湿地系统不仅可用于污水处理，还能兼具生物多样性保护、洪水调蓄等生态服务功能，是一种污水处理的生态可持续发展模式。但它的局限性也不容忽视，如在处理高浓度污水时，需要建造相应负荷流量的更大面积的人工湿地，这在我国土地资源非常缺乏的情况下应做充分权衡。此外，湿地植物在我国北方的抗冻性问题、基质的淤堵问题、植物的再资源化利用问题等也尚需进行深入的科学研究。HB

主要参考文献

[1]LIU D, WU X, CHANG J, et al. Constructed wetlands as biofuel production systems[J]. Nature Climate Change, 2012(2): 190-194.

[2]PERBANGKHEM T, POLPRASERT C. Biomass production of papyrus (*Cyperus papyrus*) in constructed wetland treating low-strength domestic wastewater[J]. Bioresource Technology, 2010(10): 833-835.

[3]SCHOLZ M, LEE BH. Constructed wetlands: a review [J]. International Journal of Environmental Studies, 2005(62): 421-447.

[4]曹笑笑, 吕宪国, 张仲胜, 等. 人工湿地设计研究进展[J]. 湿地科学, 2013, 11(1): 121-128.

[5]胡世琴. 人工湿地不同植被净化污水效果及其氮磷累积研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 200-205.

[6]刘冬, 欧阳琰, 林乃峰, 等. 人工湿地植物能源化利用的机遇、挑战与展望[J]. 湿地科学与管理, 2013, 9(4): 65-68.

[7]梁康, 王启烁, 王飞华, 等. 人工湿地处理生活污水的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 422-428.

（刘冬、徐梦佳，环境保护部南京环境科学研究所；张慧泽，河南省焦作市博爱县农科所。徐梦佳系本文通讯作者）

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net