

# 自供碳尾水湿地构建技术与应用

张 淼, 赵德华

(南京大学 生命科学学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:**针对污水处理厂尾水湿地中常存在的碳源不足、氮去除率较低问题,研发了自供碳尾水湿地构建技术体系,该技术体系包含构建湿地植物供碳周年模式、不同物候型水生植物配置效果评价、构建复合人工湿地处理系统和关键过程的参数化。技术体系已成功应用于大型尾水湿地工程示范,可广泛应用于尾水湿地构建工程。

**关键词:**人工湿地; 水生植物; 物候型; 自供碳

中图分类号:X52

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2021)04-0039-06

## Construction technology and application of self – supplied carbon tailwater wetland

ZHANG Miao, ZHAO Dehua

(School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of insufficient carbon source and low nitrogen removal rate in the tailwater wetland of sewage treatment plant, a technical system for the construction of self – supplied carbon tailwater wetland was developed, which included the construction of annual carbon supply mode of wetland plants, the evaluation of the allocation effect of different phenological aquatic plants, the construction of composite constructed wetland treatment system and the parameterization of key processes. The technical system had been successfully applied to the demonstration of large – scale tailwater wetland projects and could be widely used in tailwater wetland construction projects.

**Key words:** constructed wetland; aquatic plant; phenological type; self – supplied carbon

湿地中氮去除的主要途径是微生物硝化/反硝化作用,而污水处理厂常采用 A/O 工艺,在这一过程中消耗了大量的 COD,特别是其中的 BOD,使得污水处理厂尾水常存在碳氮比严重失衡问题,造成尾水湿地中的反硝化的碳源不足,抑制反硝化微生物活性,降低氮去除效率<sup>[1-2]</sup>。此外,与一般湿地相似,尾水湿地常受到净化能力季节性波动大、冬季净化能力不足等问题的困扰,无法满足尾水季节出水量相对均衡的净化要求。

植物是人工湿地的重要组成部分,发挥着不可忽视的功能,有提升人工湿地水质净化效果、改善

人工湿地景观等功能,湿地植物群落构建是人工湿地建设的一项重要内容。此外,湿地植物还可通过根系分泌、有机残体分解、淋溶等途径为人工湿地补充碳源,提高人工湿地氮去除<sup>[3]</sup>。芦苇、菰、菹蒲、再力花等作为目前人工湿地生态工程中最常用的水生植物种类,这些水生植物的生长旺盛期与反硝化细菌的活性旺盛期几乎重叠,使得选择的水生植物难以在微生物碳源需求旺盛期(春、夏季)提供足够的碳源,当前选择的水生植物类型及其配置往往会加剧湿地净化能力的季节性波动。因此,通过提高人工湿地中植物生物量,改善不同类型植物配

收稿日期:2020-11-09

基金项目:江苏省水利科技项目(2018064)

作者简介:张淼(1989-),男,博士研究生,研究方向为湿地修复工程。E-mail: miaozhangmz@163.com

置,可进一步发挥湿地植物供碳促进氮去除的功能。

## 1 技术原理与流程

针对目标水体碳氮比严重失衡、水体微生物反硝化能力不足的问题,依据不同湿地植物的生长—衰亡周期有序交互的特点,开展不同物候期植物组合型人工湿地构建技术研究,结合耐盐、耐水位波动及高效净化水生植物筛选研究的成果,研发适用于长江中下游重污染地区物候期互补的人工湿地植物群落构建技术,利用暖季型植物在秋冬季和冷季型植物在春夏季的自然衰亡分解有序地向低碳氮比污水补充有机碳源,以提高目标水体碳氮比,促进水体微生物的反硝化过程,增强水生态工程的净化效果和季节功能稳定性。自供碳尾水湿地构建路线见图 1。

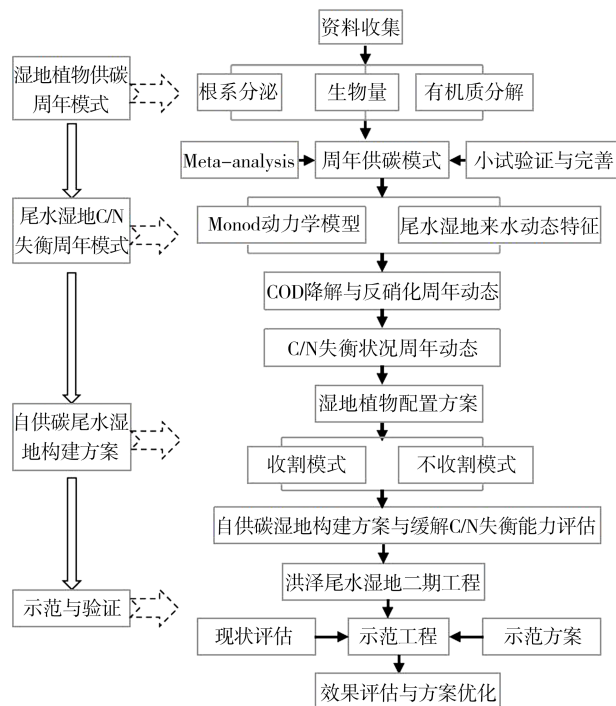


图 1 基于湿地植物供碳功能的自供碳尾水湿地构建路线

## 2 技术构成

### 2.1 湿地植物供碳周年模式构建

湿地植物生长状态、化学组成、生物生产量及其可提供碳源量及动态受多种因素的影响,导致湿地植物周年供碳动态必然存在极大的时空异质性。但是,根据一个地区的大量研究结果,可归纳出一个具有相对普适性的模式。图 2 所示为长江中下游地区暖季型湿地植物和冷季型湿地植物周年供

碳模式<sup>[3]</sup>。结果表明,暖季型湿地植物和冷季型湿地植物的周年供碳模式存在较大差异,且两类湿地植物间存在互补性特征。因此,通过在人工湿地系统中同时配置这 2 种湿地植物,可实现周年内的稳定性供碳,降低其波动性。

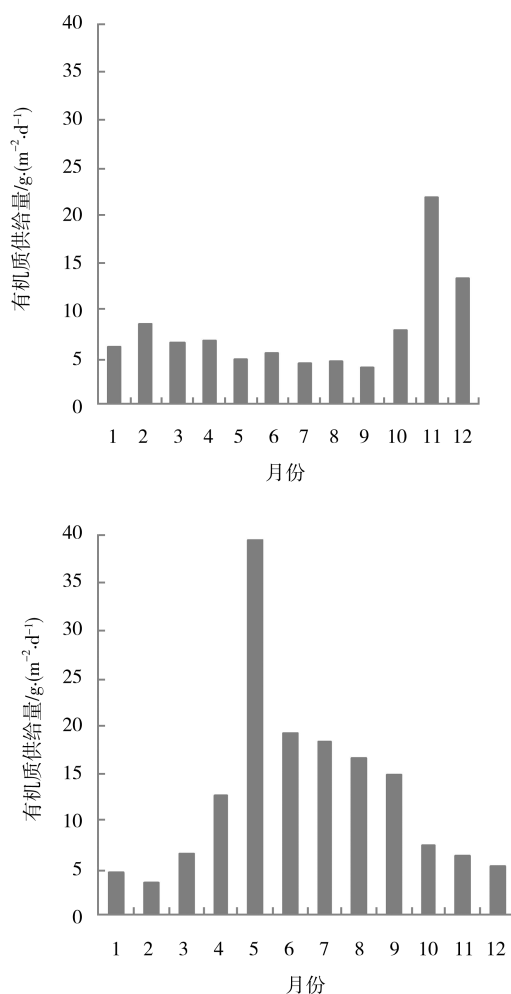


图 2 暖季型(左)和冷季型(右)湿地植物有机质供给量季节变化动态

### 2.2 供碳与净化效果评估

湿地植物的供碳动态是植物类型、各种环境因子和人工管理措施等多种因素综合影响的结果,影响植物光合作用和植物残体分解的各种因素均可以影响湿地植物的供碳动态,而植物的供碳量直接影响人工湿地的净化效果。因此正确评估湿地植物的供碳量与净化效果对其在工程中的推广应用至关重要。

为了对湿地植物周年供碳与净化效果进行评估,分别设计冷季型水生植物冬季净化效果评估与近常绿型水生植物冬季净化效果评估小试实验,以暖季型水生植物黄菖蒲和冷季型水生植物菹草组

合,以及冷季型水芹菜和暖季型水生植物黑藻组合为研究实验对象,评估基于不同物候组合的人工湿地净化效果。

暖季型水生植物黄菖蒲和冷季型水生植物菹草组合实验结果表明,不同物候组合在春夏季可显著提升人工湿地硝氮与总氮去除效率, $\text{NO}_3^-$ 和TN去除率由对照的41.6%和70.2%提升至68.6%和83.7%,而出水由对照的3.08 mg/L和4.94 mg/L降至1.04 mg/L和3.12 mg/L;而在菹草残体分解前期, $\text{NO}_3^-$ 和TN去除率分别可达82.9%和89.4%,质量浓度分别为0.53 mg/L和2.38 mg/L<sup>[4]</sup>。表明在尾水湿地碳氮失衡较为严重的春夏季,冷季型和暖季型水生植物组合可显著提升氮去除效率。

冷季型水芹和暖季型水生植物黑藻组合实验表明,不同物候组合在秋冬季可显著提升人工湿地 $\text{NO}_3^-$ 与TN去除效率,TN去除率可由对照的2.0%和25.8%提升至44.8%,而 $\text{NO}_3^-$ 去除率可由对照的14.9%和25.7%提升至48.9%<sup>[5]</sup>。表明,不同物候型水生植物组合可实现提升人工湿地低温季节污染物去除效率,并有效降低常用暖季型水生植物残体在秋冬季集中分解引起的二次污染问题。

### 2.3 复合处理系统构建

人工湿地是将污水有控制的投配到一定长宽比及地面坡度并种有水生植物的洼池中,按不同方式控制有效停留时间,并使污水沿着一定方向流动,在物理、化学、生物三者协同作用下,通过过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物降解等来实现水质净化的目的,同时人工湿地还具有强大的生态修复功能,能够改善小区域环境。人工湿地分类方式较多,通常是按水流在湿地床体中的主导流向方式差异来分类,一般分为2种:表面流人工湿地和潜流型人工湿地。

表面流人工湿地水流在基质上流过,水力负荷较小,允许藻类和浮叶植物在自由水体表面生长,由于浮叶植物比挺水植物具有更高的光合活性,产生的氧气可间接使二氧化碳转移,降低水体pH值,从而去除磷酸盐和促使氨挥发,硝化强度较好,但也存在夏季容易滋生蚊蝇,处理负荷相对较低,去污能力有限等缺点。

潜流型湿地保温效果好,卫生条件也较好,能充分利用湿地的空间,发挥植物、微生物和基质三者协同作用,但其投资成本较高。单一类型人工湿地运行效果差、溶氧水平低、氨氮处理效率低,且容易发生运行问题。

因此,将几种不同类型的人工湿地进行串联,组成复合人工湿地系统,这种组合不仅延长了污水的停留时间,提高污染物的净化效率,同时还增加了系统的抗负荷能力和稳定性,能够有效防止湿地基质堵塞现象。结合工程需要,利用水生植物提高碳氮失衡尾水湿地TN去除率,构建一个复合处理系统,该复合处理系统包括稳定塘——表面流湿地——生态输水渠——水平潜流湿地4个子系统,各子系统间通过各工艺依次串联,如图3所示。

### 2.4 工艺要求

复合处理系统通过水生植物吸收、微生物硝化/反硝化、物理沉降和自然挥发等途径,逐步去除水体 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,其核心在于各工艺中大量种植的水生植物,冷季型和暖季型水生植物配置面积比2:1,水生植物全年不收割,通过水生植物根系分泌有机质和残体分解作用,逐步改善水体中的碳氮失衡状况,进一步提高氮去除率,而且由于冷季型和暖季型水生植物的配置,避免出现了水生植物分解导致的二次污染。

复合处理系统中,稳定塘水深3.0~4.0 m,生态输水渠最深不超过1.5 m,表面流湿地水深0.3~1.5 m;(稳定塘+生态输水渠+表面流湿地)与水平潜流湿地面积比大于5:1,水力停留时间2~4 d。

水生植物群落实行冷季型和暖季型植物间种,总面积比为2:1。水生植物群落具体配置方式:稳定塘岸边浅水区挺水植物以芦苇、花叶芦竹、香蒲和水生鸢尾为主,浮叶植物以铜钱草为主,浮床植物以冷季型的水芹为主,植物总体覆盖度大于20%;生态输水渠水生植物群落包括沉水植物和挺水植物,其中,沉水植物包括菹草和穗花狐尾藻,挺水植物以芦苇、花叶芦竹、香蒲和水生鸢尾为主,水面水生植物盖度在30%~50%之间;表面流湿地水生植物包括芦苇、花叶芦竹、香蒲和水生鸢尾;水平潜流湿地水生植物群落以芦苇和水生鸢尾为主。

## 3 技术应用

### 3.1 示范工程简介

该技术应用于《南水北调东线沿线城市洪泽区尾水收集处理及利用工程二期》(下称《二期工程》,相对应的前期工程《南水北调东线沿线城市洪泽尾水收集处理及利用工程》称之为《一期工程》),该工程立项背景为:随着人口增长和社会经济的快速发展,污水处理厂尾水排放引起的环境问题日趋严重,通过生物-生态处理技术对污水处理厂达标排

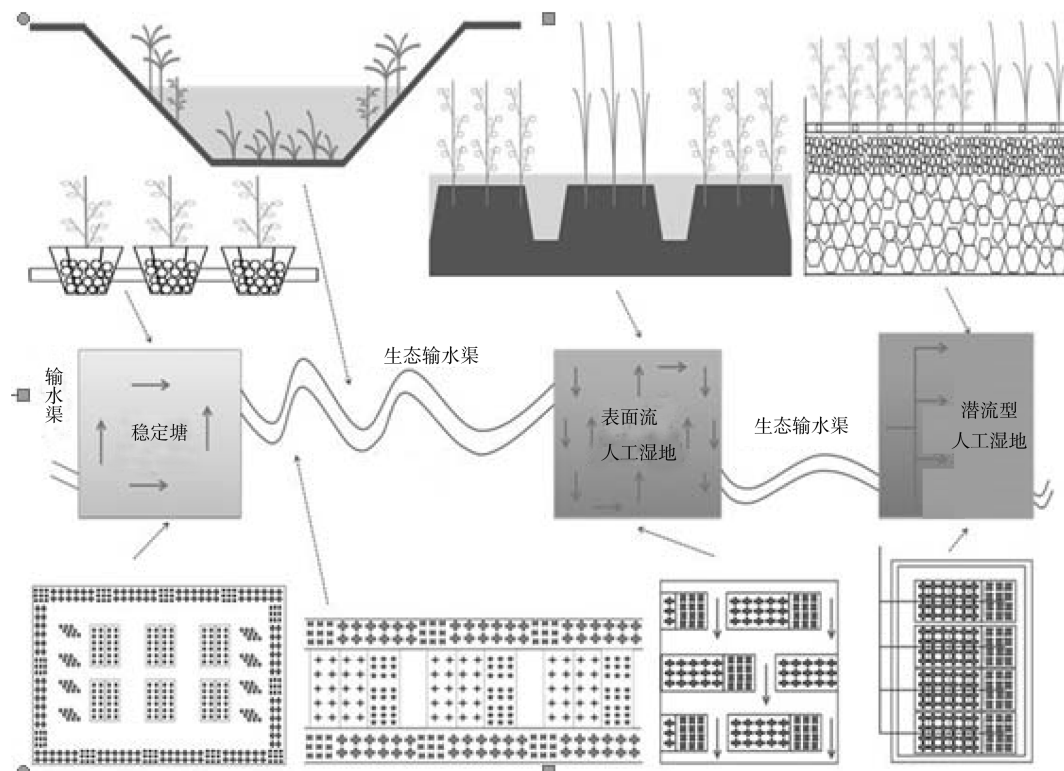


图3 复合处理系统平面图

放的尾水进行收集、处理和再利用,减少污染物排放量,减轻水环境压力,是实现水资源可持续利用的重要举措。洪泽尾水收集处理及利用工程利用宁连高速公路东侧天然的绿化用地对洪泽污水处理厂尾水进行处理和再利用,项目的实施能够有效改善白马湖水生态环境,有利于保障南水北调东线工程调水水质及淮安市区饮用水安全。

2011年3月洪泽区尾水收集处理及利用工程一期完工并投入试运行,项目利用洪泽区内宁连高速公路东侧,苏北灌溉总渠以南,宽约500 m、长约6 500 m的地块,建设人工湿地、稳定塘等,对污水处理厂尾水进行生物-生态处理,处理后的尾水一部分用于农业灌溉、生态补水,多余水穿越苏北灌溉总渠排入入海水道。

《二期工程》立项主要基于2个方面的考虑。一是为了进一步扩大尾水处理规模(从一期的每日60 000 t提升至每日100 000 t);二是在《一期工程》的基础上进一步提升尾水处理效果,拟在该项目当前建设的基础上进行二期工程建设,进一步地完善工程管护设施,提高项目运行和管护水平,更好地发挥工程和生态环境效益,以打造江苏水利科技示范教育基地和水资源综合利用示范基地。

### 3.2 水生植物群落恢复效果

示范工程建成运行后,对示范区各监测区段的

水生植物群落进行调研。不同监测区段的水生植物物种数量以及生物量均有大幅度提高(表1~2)。与示范工程建设前相比,1#曝气塘水生植物物种数增加了11种,生物量增加了87.2%;生态廊道水生植物物种数增加了5种,生物量增加了32.5%;1#兼性塘水生植物物种数增加了7种,生物量增加了12.6%;南线工程表面流湿地水生植物物种数增加了9种,生物量增加了32.9%;输水渠水生植物物种数增加了5种,生物量增加了6.18倍;潜流湿地水生植物物种数增加了3种,生物量增加了38.9倍。

## 4 结 语

本研究研发了自供碳尾水湿地构建技术,形成了该新型技术应用流程。通过构建长江中下游地区不同类型湿地植物周年供碳模式,以及评估不同类型湿地植物配置的效果,表明暖季型和冷季型湿地植物配置可极大提高人工湿地氮的去除效率。进一步,将该技术体系成功应用于大型尾水湿地工程,提升了尾水湿地植物生物量,取得了良好的景观效果。该技术的成功应用可为正在兴起的污水处理厂尾水湿地提供良好的示范,保障尾水湿地正常运行,提升尾水湿地工程效益和生态环境效果。

表 1 2014 年尾水湿地不同单元水生植物面积与生物量

单元名称	占地面 积/m <sup>2</sup>	水生植物分布面积/m <sup>2</sup>				地上生物量/kg			
		2014 年 4 月	2014 年 7 月	2014 年 10 月	2015 年 1 月	2014 年 4 月	2014 年 7 月	2014 年 10 月	2015 年 1 月
1#曝气塘	66 775	2 591	3 990	3 912	570	3 352	7 461	7 197	67.5
1#生态廊道	2 490	1 469	1 763	1 616	309	1 932	3 006	2 650	50.5
1#兼性塘	82 563	2 160	2 614	2 419	24	2 739	5 414	5 043	1.5
1-5#表面流湿地	344 232	77 632	97 117	87 212	2 950	97 689	208 266	189 578	126.4
1#输水渠	1 791	215	112	355	187	294	145	404	51.8
1#生态塘	49 819	930	1 144	1 074	10	1 172	2 443	2 322	0.5
2#输水渠	16 110	1 015	1 167	1 411	680	1 351	1 841	2 093	135.4
3#输水渠道	195	0	0	0	0	0	0	0	0.0
6#表面流湿地	60 000	3 039	4 015	3 845	18	3 853	8 316	8 015	1.1
4#输水渠道	1 680	0	0	0	0	0	0	0	0.0
2#兼性塘	141 250	95	126	120	0	118	289	284	0.0
潜流湿地 1 期	24 000	627	952	790	273	784	2 095	1 769	7.6
潜流湿地 2 期	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
5#输水渠道	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
7#表面流湿地	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
8#表面流湿地	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
6#输水渠道	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
2#生态塘	58700	563	675	754	20	714	1392	1563	1.3
7#输水渠道	2400	0	0	0	0	0	0	0	0.0
总计	912 005	90 895	114 301	104 110	5 041	114 690	242 109	222 346	444

表 2 2017 年尾水湿地不同单元水生植物面积与生物量

单元名称	占地面 积/m <sup>2</sup>	水生植物分布面积/m <sup>2</sup>				地上生物量/kg			
		2017 年 4 月	2017 年 7 月	2017 年 10 月	2018 年 1 月	2017 年 4 月	2017 年 7 月	2017 年 10 月	2018 年 1 月
1#曝气塘	66 775	4 850	7 469	7 323	1 067	6 274	13 966	13 474	126.4
1#生态廊道	2 490	1 967	2 203	2 164	1 397	2 587	3 757	3 548	228.8
1#兼性塘	82 563	2 433	2 944	2 725	27	3 084	6 097	5 680	1.7
1-5#表面流湿地	344 232	103 173	129 069	11 594	8 047	129 829	276 786	251 950	344.8

续表 2 2017 年尾水湿地不同单元水生植物面积与生物量

单元名称	占地面 积/m <sup>2</sup>	水生植物分布面积/m <sup>2</sup>				地上生物量/kg			
		2017 年 4 月	2017 年 7 月	2017 年 10 月	2018 年 1 月	2017 年 4 月	2017 年 7 月	2017 年 10 月	2018 年 1 月
1#输水渠	1 039	540	1 195	1 309	727	1 421	699	1 360	362.9
1#生态塘	49 819	1 098	1 350	1 267	12	1 383	2 883	2 740	0.5
2#输水渠	16 110	9 344	7 942	7 382	8 129	12 441	12 527	10 953	1 618.8
2#曝气塘	60 000	883	989	954	0	1 094	2 275	2 254	0.0
3#输水渠道	195	23	23	23	23	31	35	32	5.3
6#表面流湿地	60 000	22 977	30 353	29 066	138	29 131	62 870	60 596	8.7
4#输水渠道	1 680	202	202	202	0	250	464	476	0.0
2#兼性塘	141 250	602	795	759	0	745	1 828	1 792	0.0
潜流湿地 1 期	24 000	2 106	3 200	2 653	273	2 635	7 039	5 944	7.6
潜流湿地 2 期	60 000	16 800	34 680	31 620	4 380	20 962	77 226	71 902	88.3
5#输水渠道	1 305	104	8	1	0	129	19	2	0.0
7#表面流湿地	170 076	18 495	24 413	23 488	980	23 142	53 693	52 626	27.2
8#表面流湿地	115 555	15 022	22 984	20 430	631	18 815	50 340	45 547	19.1
6#输水渠道	1 400	112	136	147	4	140	302	334	0.1
2#生态塘	58 700	1 105	1 326	1 481	40	1 402	2 735	3 071	2.6
7#输水渠道	2 400	264	356	319	77	335	732	659	5.2
总计	1 259 589	202 099	271 637	249 216	25 952	255 831	576 272	534 939	2 848

## 参考文献:

- [1] 陈亮, 刘锋, 肖润林, 等. 人工湿地氮去除关键功能微生物生态学研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(18):1-10.
- [2] 陈晶, 邓文, 陈萍, 等. 反硝化细菌强化潜流湿地的污水处理厂尾水脱氮试验[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(1):262-266.
- [3] 赵德华, 吕丽萍, 陈扬, 等. 湿地植物供碳功能与优化[J]. 生态学报, 2018, 38(16):5961-5969.
- [4] ZHAO D, ZHANG M, LIU Z, et al. Can cold - season macrophytes at the senescence stage improve nitrogen removal in integrated constructed wetland systems treating low carbon/nitrogen effluent? [J]. Bioresource Technology, 2018, 265:380-386.
- [5] ZHAO D, CHEN C, LU Q, et al. Combined use of cold - season and warm - season macrophytes in floating constructed wetlands to increase nitrogen removal in the early cold season [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 254:20-22.