

外加电压对人工湿地处理生活污水效果的影响

罗昕怡, 叶延超, 石玉翠, 游少鸿

引用本文:

罗昕怡, 叶延超, 石玉翠, 等. 外加电压对人工湿地处理生活污水效果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1297-1304.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1236>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微电场人工湿地系统对水中重金属Cd Zn和Cu去除效果的研究

张弦, 王宇晖, 赵晓祥, 沙懿

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1211-1218 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1410>

固定反硝化菌强化人工湿地处理低污染水研究

林燕, 张焕杰, 刘曦, 俞璐, 朱文颖, 孔海南

农业环境科学学报. 2016, 35(11): 2154-2162 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0540>

不同植物类型复合垂直流人工湿地根系微生物群落结构的研究

蒋旭瑶, 吉喜燕, 黄德英, 张继彪

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 176-183 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0250>

不同基质厌氧折流-垂直流人工湿地(ABR-VFW)对农村生活污水的处理效果

刘娟, 谢雪东, 张洋, 雷平, 顾儒馨, 倪九派

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1758-1766 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1442>

不同植物组合人工湿地中磷去向特征研究

叶磊, 李希, 田日昌, 吴凤平, 孟岑, 夏梦华, 郭宁宁, 凡翔, 李裕元, 王辉

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2409-2419 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0761>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

罗昕怡, 叶延超, 石玉翠, 等. 外加电压对人工湿地处理生活污水效果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1297–1304.

LUO Xin-yi, YE Yan-chao, SHI Yu-cui, et al. Effects of voltage on the efficacy of domestic sewage treatment by constructed wetlands[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(6): 1297–1304.



开放科学 OSID

外加电压对人工湿地处理生活污水效果的影响

罗昕怡, 叶延超, 石玉翠, 游少鸿*

(桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:为强化人工湿地去除污染物的性能,将外加电压与人工湿地结合,以探究湿地系统的最佳电压和运行条件。结果表明:种植植物且施加0.5 V和1 V电压(CW-0.5和CW-1)处理对植物生理特征变化无显著影响,且生长趋势优于对照组(种植植物施加0 V电压),而在种植植物施加2 V电压(CW-2)处理下,植物叶片中叶绿素含量降低,可溶性蛋白浓度、丙二醛(MDA)含量及SOD、POD和CAT活力增加;外加电压下人工湿地系统的最佳运行条件在水力停留时间为2 d、施加电压为1 V时,COD、 NH_4^+-N 、TN和TP的去除率分别为95.2%、92.5%、85.9%和98.2%,相较于对照组分别提高了9.3%、6.9%、10.3%和5.3%;在CW-2处理下,微生物乳酸脱氢酶(LDH)活力和蛋白质浓度相较于对照组分别提高10%和21%,三磷酸腺苷(ATP)浓度比对照组降低了14%,微生物多样性和丰富度下降,微生物活性受到抑制。研究表明,适宜电压能够促进植物生长发育,提高微生物活性和多样性,强化人工湿地系统去除污染物的性能。

关键词:人工湿地;植物生理特性;微生物活性;电压;生活污水

中图分类号:X799.3 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)06-1297-08 doi:10.11654/jaes.2020-1236

Effects of voltage on the efficacy of domestic sewage treatment by constructed wetlands

LUO Xin-yi, YE Yan-chao, SHI Yu-cui, YOU Shao-hong*

(Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: To enhance the performance of constructed wetlands for the removal of pollutants, combined applied voltage with constructed wetlands, and explored the optimal voltage and operating conditions of wetlands systems. Our results showed a positive effect following CW-0.5 and CW-1 treatments on plant physiological characteristics and a better growth trend was observed than that of the control group. Following the CW-2 treatment, the contents of chlorophyll in plant leaves decreased, soluble protein, superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), malondialdehyde (MDA), and CAT increased in plant leaves. Optimal operating conditions of constructed wetlands system under applied voltage were 2 days with hydraulic retention time at 1 V and the removal efficiency of chemical oxygen demand (COD), ammonia (NH_4^+-N), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were 95.2%, 92.4%, 85.9%, and 98.2%, respectively. Compared with the control group, these efficiencies increased by 9.3%, 6.9%, 10.3%, and 5.3%, respectively. At CW-2 disposal, microbial lactate dehydrogenase (LDH) and protein levels increased by 10% and 21%, respectively, while adenosine triphosphate (ATP) concentration decreased by 14% compared with the control group; moreover, microbial diversity and abundance reduced and microbial activity was inhibited. Thus, this study showed that suitable voltage can promote plant growth and development, improve microbial activity and diversity, and strengthen the performance of constructed wetlands systems to remove pollutants.

Keywords: constructed wetland; physiologic characteristics of plants; microbial activity; voltage; domestic sewage

收稿日期:2020-10-27 录用日期:2021-02-26

作者简介:罗昕怡(1996—),女,福建南平人,硕士研究生,从事人工湿地污水处理研究。E-mail:lx939085965@163.com

*通信作者:游少鸿 E-mail:youshaohong@glut.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(51868010);桂林市科学研究与技术开发计划课题(20190219-3)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51868010); Guilin Science and Technology Development Program(20190219-3)

人工湿地具有去除效果稳定、成本低、易于操作和维护等特点,被用于处理污染废水已有几十年。在人工湿地中,植物、基质和微生物协同作用,通过植物的吸收富集、基质的吸附和过滤以及微生物分解等过程实现废水中氮、磷、有机物等污染物的去除^[1-3]。此外,溶解氧浓度的差异和氧化还原梯度的变化使微生物形成不同的生态位,这些微生物可以进行不同的呼吸或发酵过程,从而显示出广泛的污染物去除能力^[4-5]。但人工湿地长期运行后会出现有机碳源不足、堵塞以及填料吸附饱和等问题。

电解法是通过外加电场,在阴阳两极发生氧化还原、絮凝、沉淀等反应促进系统对污染物的去除效果,其具有装置体积小、电化学反应可控性强、操作维修简单、无二次污染等优点,是一种环境友好型处理技术。电解法已广泛用于处理染料废水、城市垃圾渗滤液、皮革废水等。电解对植物生长发育和微生物活性有显著影响,适宜的电解强度有利于刺激植物生长发育、提高酶活性,特别是在调节抗氧化防御系统的活性方面,可以增强植物在逆境中的适应能力^[6-8];而生物反应器中的微生物群落结构可以随着电解强度的改变而改变,并且电解对微生物的活化作用可以强化生物转化能力,加快污染物的迁移和转化,提高生物反应器对污染物的去除效率^[9-11]。此外,电解作用能够改变污染物的化学形态,通过氧化、还原、絮凝等作用去除污染物。人工湿地与电解技术耦合,以提高湿地系统去除污染物的净化效果。GAO等^[12]构建新型电解一体化水平潜流人工湿地系统,用于强化氮磷污染水体的去除。当电解电流强度稳定在 $0.07 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$,水力停留时间在2~12 h时,硝酸盐去除率由20%提高到84%;当水力停留时间大于4 h时,磷的去除率保持在90%以上。王皓等^[13]构建电解强化-三级串联潜流人工湿地,研究结果表明当水力负荷为 $0.30 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,电解系统对 TN 、 NH_4^+-N 和 TP 的去除率分别为 $92.99\% \pm 4.51\%$ 、 $95.22\% \pm 3.04\%$ 和 $93.13\% \pm 5.22\%$,填料的吸附和沉淀作用对磷的去除贡献率在70%以上,能够高效地去除农村生活污水中的氮磷物质。

本研究将电化学技术与人工湿地系统耦合,从电解对植物生理特征的响应、不同水力停留时间下污染物的去除效果以及微生物活性和多样性变化等方面综合探究合适的外加电压和运行条件,以强化人工湿地系统去除污染物的性能。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行

试验装置如图1所示,本模型反应器采用聚氯乙烯管材制作而成,用于模拟垂直流人工湿地,直径0.3 m、高1 m,容器有效容积30 L,平均孔隙率30%。在反应器底部填充15 cm厚的碎石(粒径3~4 cm),中、上层填充75 cm厚的焦炭(粒径3~4 mm)。装置内部紧靠桶壁两侧设置两根石墨电极棒(直径3 cm、长120 cm)用作阴、阳电极,间距为24 cm。电极用铜线分别与直流电源的正极和负极触点相连,采用迈胜KL305D型直流稳压电源。试验选择李氏禾作为湿地植物,植物购买于桂林当地人工繁育田,用霍格兰氏营养液水培5 d后,取相似高度(约60 cm)和鲜质量(约500 g)的李氏禾种植于阴、阳电极之间。反应器从底部进水,废水储存于200 L的塑料桶中,在单通道蠕动泵的作用下依次传输进入各个人工湿地系统中。

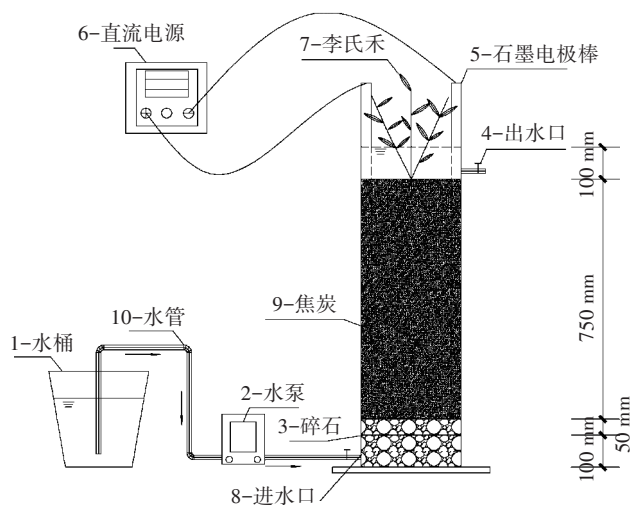


图1 外加电压人工湿地装置示意图

Figure 1 Chart of applied voltage constructed wetland

李氏禾人工湿地系统试验装置分为4组,每组3个平行,分别为种植植物施加电压0 V的对照组(CW-0)和种植植物施加电压分别为0.5 V(CW-0.5)、1 V(CW-1)、2 V(CW-2)的试验组。所有实验设备均放置在桂林理工大学污水处理站大棚内,以3 d为一个周期,每周测定一次水质指标,每两个周期测定一次植物指标,环境温度保持在28~33 ℃。此外,考虑到不同水力停留时间对人工湿地去除COD、氮和磷效率的影响,试验设计了3个水力停留时间(0.5、2、3 d),每个水力停留时间重复3次试验。

1.2 试验用水

试验采用合成生活废水,用自来水进行配制,试剂用量如表1所示。合成生活废水中COD平均浓度为 $205.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总氮平均浓度为 $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+-N 平均浓度为 $43.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总磷浓度为 $3.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表1 合成生活污水组成成分

Table 1 Composition of synthetic domestic sewage

试剂 Reagent	浓度 Concentration/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
$\text{C}_2\text{H}_5\text{NaO}_2$	1
KH_2PO_4	0.009
NaHCO_3	0.2
MgSO_4	0.01
NH_4Cl	0.1

1.3 样本分析

使用多参数水质分析仪原位测定出水中的pH、溶解氧、电导率和氧化还原电位。使用重铬酸钾微波消解法测定COD,纳氏试剂分光光度法测定 NH_4^+-N ,钼酸铵分光光度法测定TP,碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定TN。叶绿素含量采用95%乙醇提取法测定,丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定。可溶性蛋白、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)、微生物三磷酸腺苷(ATP)、乳酸脱氢酶(LDH)以及微生物蛋白含量使用试剂盒进行测定,试剂盒购买于上海纪宁实业生物科技有限公司。利用高通量测序技术对微生物群落多样性进行分析,由生工生物工程有限公司进行测定。

1.4 数据统计分析

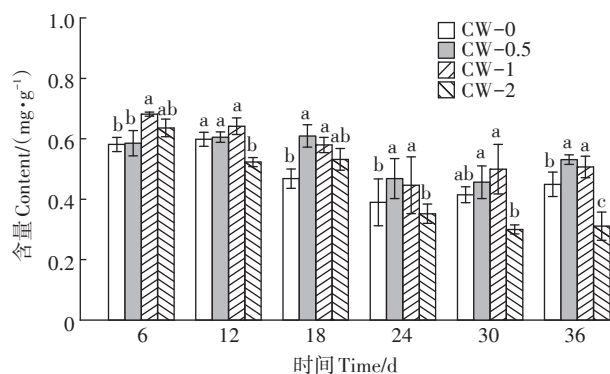
使用Origin 2019b对数据进行初步处理和绘图,使用SPSS 23进行单因素方差分析和显著性检验。

2 结果与分析

2.1 外加电压下李氏禾的生理响应

2.1.1 外加电压对李氏禾叶绿素含量的影响

叶绿素是光合作用的关键因素,在光合作用过程中起到吸收和转化能量的作用,是直接反映植物受环境胁迫程度的敏感性生理指标^[14]。如图2所示,在通电条件下,李氏禾叶片叶绿素的含量随时间延长呈下降趋势,这与葛依立等^[15]的研究结果一致。在电压胁迫18 d内,叶绿素含量下降缓慢,推测是短时间内电压胁迫对植物生长影响较小。在CW-0.5和CW-1处理下叶片叶绿素含量无显著差异($P>0.05$),均高于对照组,表明适宜电压能够引起细胞增殖、缩短有丝分



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same below

图2 电压胁迫下李氏禾叶绿素含量的变化

Figure 2 Content of chlorophyll in *Leersia hexandra* under voltage stress

裂周期,从而促进植物合成色素,加快植物生长。在CW-2处理下第36 d的叶绿素含量是对照组的61%,存在显著差异($P<0.05$),表明2 V电压对植物产生显著影响,这可能是因为叶绿体中镁离子浓度下降所造成。镁不仅是叶绿体的中心原子,还有一些代谢途径关键酶的辅因子,镁离子浓度不足时会破坏叶绿体结构的稳定性,抑制叶绿体的合成和叶绿素合成酶的活性,进而影响光合作用的进行^[16]。

2.1.2 外加电压对李氏禾可溶性蛋白浓度和MDA含量的影响

作为渗透调节物质,可溶性蛋白参与了植物体内多数的代谢活动,其浓度在植物受到渗透胁迫时迅速增加,以保持细胞膜的水分平衡,减少胁迫带来的伤害^[17-18]。如图3A所示,可溶性蛋白浓度随时间的延长先逐渐升高而后趋于稳定;试验第36 d,CW-2处理与CW-0、CW-0.5、CW-1处理存在显著差异($P<0.05$)。结果表明,李氏禾通过提高可溶性蛋白的浓度以适应电压胁迫环境。渗透调节物质的浓度在一定程度上反映了植物的抗逆性,浓度越高表示抗逆性越强。

电压胁迫下, O_2^- 、 OH^- 和 H_2O_2 的含量增加,造成植物细胞内的活性氧失衡,从而破坏脂类物质,加剧膜脂过氧化,影响膜系统的结构和功能^[19]。MDA是常用的膜脂过氧化指标,其含量的变化可反应逆境胁迫对植物细胞膜的破坏程度^[20]。如图3B所示,MDA的含量随时间延长持续增加。CW-2处理下,MDA含量始终高于对照组和其他试验组,36 d时MDA含量是对照组的1.2倍。结果表明,2 V电压下植物体内活

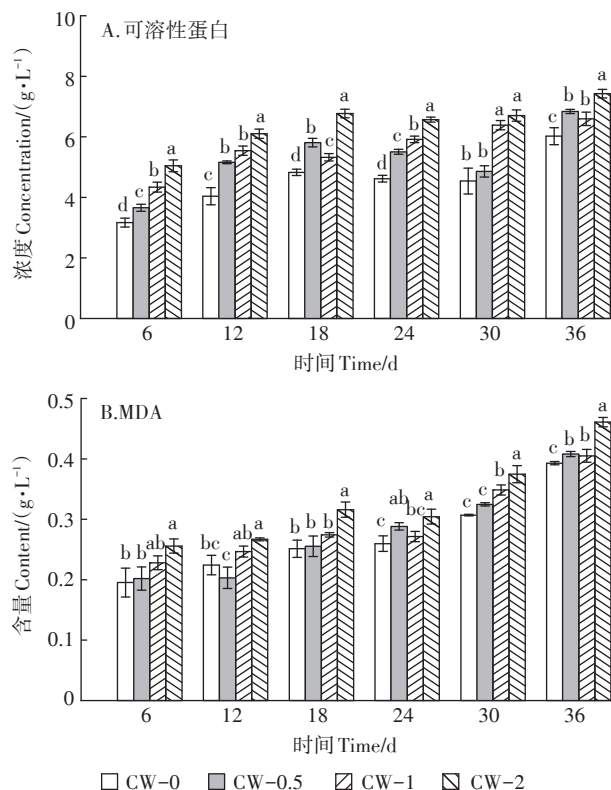


图3 电压胁迫下李氏禾可溶性蛋白浓度和MDA含量的变化
Figure 3 Concentration of soluble protein and content of MDA in *Leersia hexandra* under voltage stress

性氧自由基大量增加,但对自由基的消除能力较差,从而造成严重的膜脂过氧化损伤。

2.1.3 外加电压对李氏禾抗氧化酶活力的影响

抗氧化酶是清除活性氧的关键因素,包括SOD、POD和CAT。抗氧化酶可以有效抑制活性氧自由基的积累,阻止细胞膜脂过氧化,与植物的生长发育和抗逆性密切相关。如图4A和图4B所示,李氏禾叶片内SOD和POD活力随胁迫时间的延长而增加。处理12 d时,试验组SOD活性无显著差异;处理36 d时,CW-2的SOD活力显著高于对照组和其他试验组($P < 0.05$)。POD活力在12 d时各试验组无显著差异,18 d时增长速度加快,36 d时CW-2显著高于CW-0、CW-0.5和CW-1($P < 0.05$)。结果表明,李氏禾启动抗氧化防御系统,通过增加SOD、POD的活力阻止活性氧毒害细胞,提高植物体在电压胁迫下的耐受能力。如图4C所示,CAT活力随时间延长逐渐下降,与SOD和POD呈相反趋势,其原因可能是植物体消耗抗氧化剂所造成^[21]或植物体对不同酶的响应灵敏度不同^[22]。

2.2 外加电压对人工湿地污染物去除率的影响

图5为人工湿地不同水力停留时间内污染物去

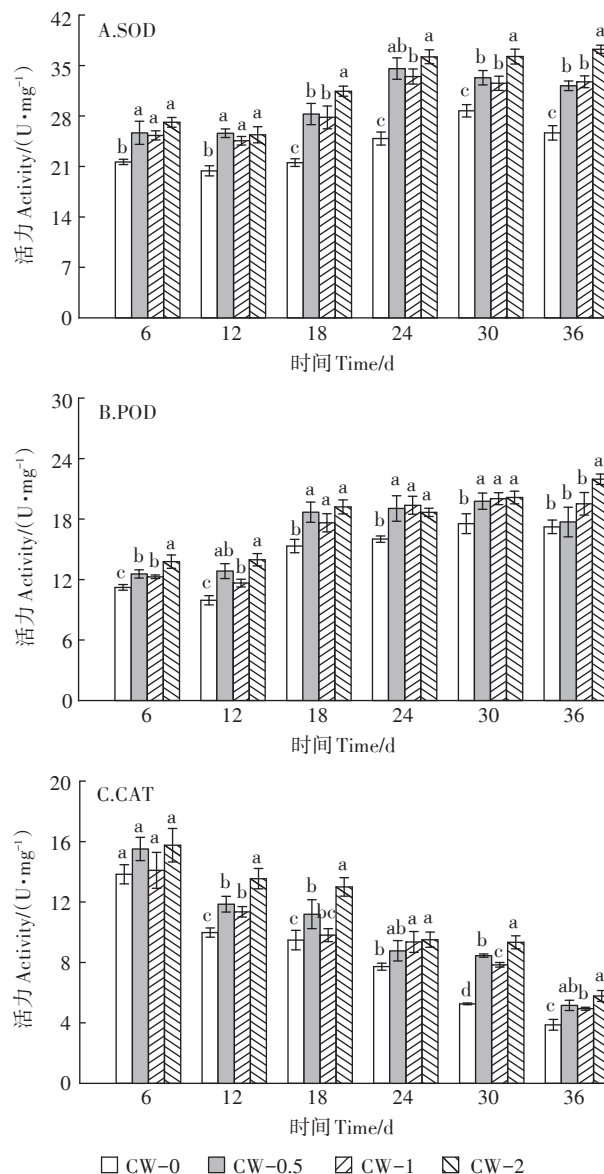


图4 电压胁迫下李氏禾SOD、POD和CAT活力的变化
Figure 4 Activity of SOD, POD, CAT in *Leersia hexandra* under voltage stress

除率的变化。如图5A所示,对照组与试验组的COD去除率呈先上升后下降的趋势,且水力停留时间为2 d时的去除效果最佳。在CW-1处理下,COD去除率显著高于对照组和其他试验组($P < 0.05$),在水力停留时间为2 d时达到峰值95.2%;水力停留时间为3 d时,COD的平均去除率降低了10%。结果表明,随水力停留时间的增加,反应器中微生物数量增加,废水中有机碳源减少,微生物活性降低,导致去除率下降。CW-0.5和CW-1处理下COD去除率与对照组存在显著差异($P < 0.05$),表明电极系统的电解作用可以使复杂的有机物发生开环和断链,产生的活性基团促进了

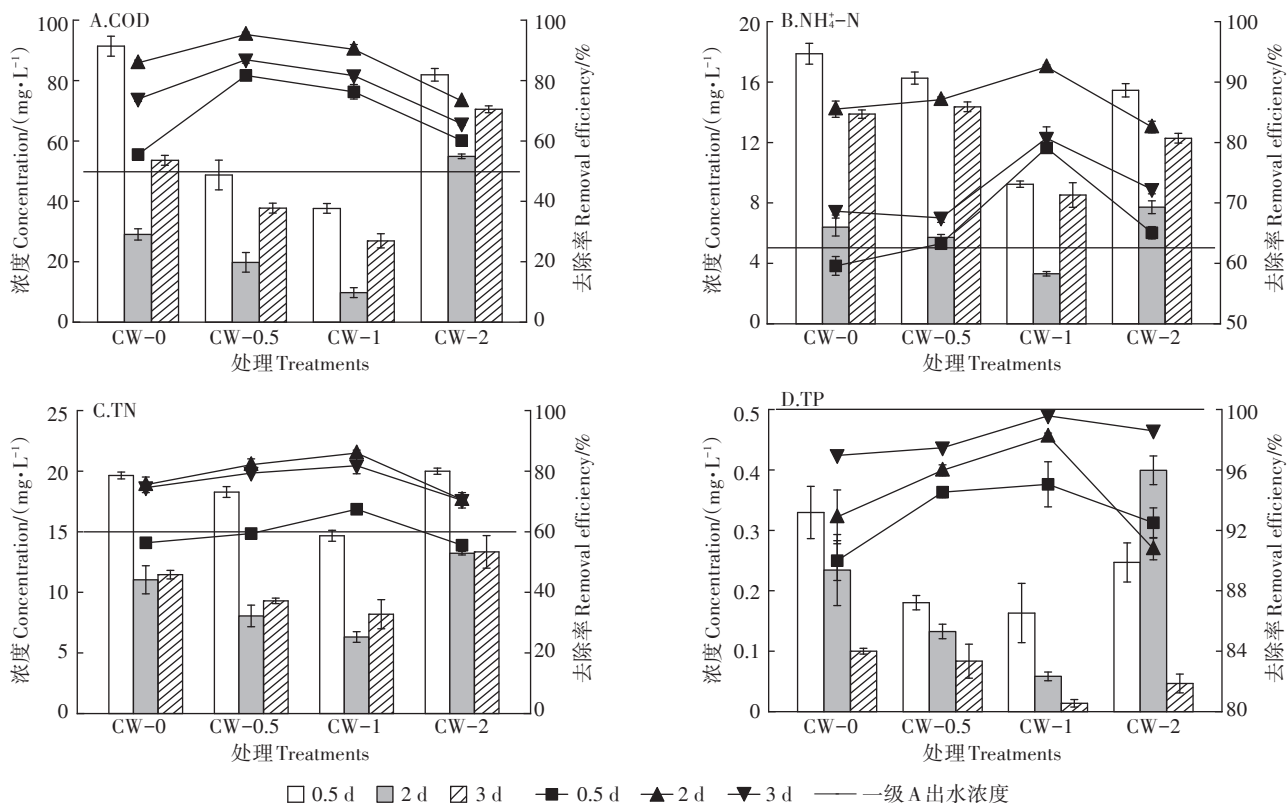


图5 电压胁迫对人工湿地COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP去除率的影响($n=3$)

Figure 5 The effect of voltage stress on COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and TP removal efficiency of constructed wetland($n=3$)

难降解有机物分解为小分子^[23-24];此外,电场对植物的诱导作用加快了根系分泌氧的速率,湿地系统内好氧菌群数量增加、活性增强,从而提高微生物对人工湿地中有机物的降解率。

人工湿地系统在外加电压的作用下一方面电解水产生的氢可作为自养反硝化菌的供电体,另一方面可刺激微生物新陈代谢,增强微生物脱氮能力。如图5B和图5C所示, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的去除率随水力停留时间的增加均呈先上升后下降的趋势。水力停留时间为0.5 d时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为59.1%~79.1%;当水力停留时间为2 d时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率达到峰值为85.5%~92.5%,可见,水力停留时间对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果影响显著($P<0.05$)。水力停留时间为2 d和3 d时,TN去除率无显著差异($P>0.05$),但与水力停留时间0.5 d存在显著差异($P<0.05$)。结果表明,高电压作用下湿地系统的微生物活性受到抑制,并且生物膜上氢浓度升高产生氢抑制现象,导致部分生物膜脱落; NO_3^- 在高电压胁迫下更容易向阳极移动,使得阴极附近的 NO_3^- 浓度降低,影响反硝化效果^[24-25]。此外,水力停留时间的增加导致碳源不足,且阳极可能产生过多的 CO_2 ,降低溶液pH值,不利于微生物生长,从而影响去

除效率^[26]。

人工湿地通过基质吸附、化学沉淀、微生物同化和植物吸收实现磷的去除^[27]。如图5D所示,TP去除率在各水力停留时间下均保持在90%以上。水力停留时间为3 d时,CW-1处理下TP去除率达到99.6%。由于植物吸收和微生物同化对磷的去除量极其有限(低于8%),因此基质吸附与化学沉淀通常是除磷的主要途径^[28]。焦炭填料中含有大约20%的 Fe^{3+} 可与水体中的 OH^- 结合生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$,实现电絮凝作用除磷^[29]。

2.3 外加电压对微生物ATP、LDH、蛋白浓度和多样性的影响

2.3.1 外加电压对ATP浓度的影响

ATP是微生物重要的能量储存物质,它为微生物的代谢提供能量^[30],在物质和能量循环中起着重要作用。如图6所示,ATP浓度在CW-0.5和CW-1处理下较对照组增加了24%和31%,但在CW-2处理下降低了14%。结果表明,适宜电压能够增加ATP浓度,促进微生物的生长和代谢,但高电压对微生物的生长活性具有负面影响。

2.3.2 外加电压对LDH浓度的影响

LDH是一种主要存在于细胞质中的糖酵解酶。

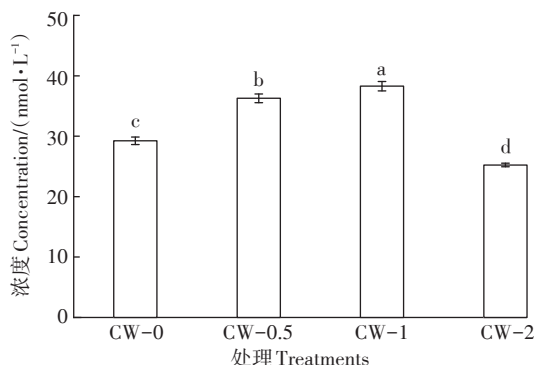


图6 电压胁迫对人工湿地内ATP浓度的影响

Figure 6 The effect of voltage stress on ATP concentration of constructed wetland

正常情况下,由于细胞膜的保护,溶液中LDH的浓度较少,但当细胞膜被破坏时,溶液中LDH的浓度增加,因此LDH可以作为细胞破裂的指标^[30]。如图7所示,CW-0.5和CW-1处理下LDH浓度与对照组几乎相等,无显著差异($P>0.05$)。在CW-2处理下,LDH浓度是对照组的1.10倍,有明显的上升趋势,存在显著差异($P<0.05$)。结果表明,外加电压会影响细胞膜的电学性质,细胞膜内带正电,外膜带负电,如果细胞膜的电特性发生变化,细胞膜就有可能被破坏^[31]。此外,细胞膜上的离子和分子通道受某些特殊离子如 Ca^{2+} 的控制,施加电压过大也可能影响 Ca^{2+} 的浓度,从而导致细胞破裂^[32]。

2.3.3 外加电压对蛋白质浓度的影响

蛋白质是用于细胞间信息交流和保持细胞稳定的重要组成物质之一,菌体溢出到溶液中的蛋白质浓度可以表示微生物细胞膜通透性的变化。由图8所示,CW-0和CW-0.5处理下,蛋白质浓度无显著差异($P>0.05$);CW-1和CW-2处理下蛋白质浓度分别是

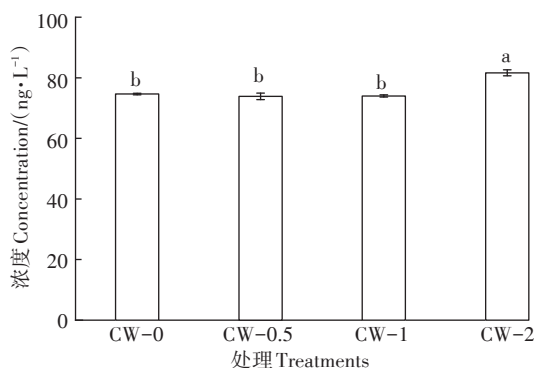


图7 电压胁迫对人工湿地内LDH浓度的影响

Figure 7 The effect of voltage stress on LDH concentration of constructed wetland

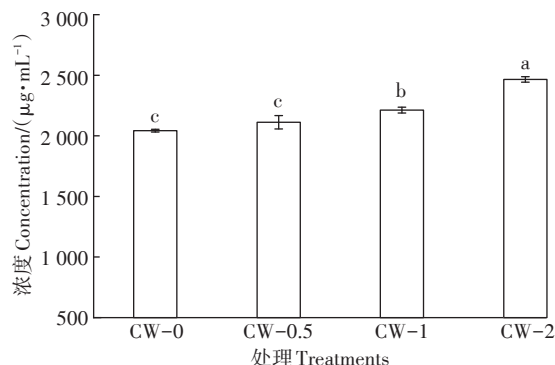


图8 电压胁迫对人工湿地内蛋白浓度的影响

Figure 8 The effect of voltage stress on protein concentration of constructed wetland

对照组的1.08倍和1.21倍,与对照组存在显著差异($P<0.05$)。结果表明,适宜的电压刺激能够在不损坏细胞膜的情况下增加细胞膜的通透性,更有利于细胞内外物质的转运^[33]。同时,作为胞外基质和胞外聚合物的主要大分子组分,蛋白质浓度增加也说明适宜的电压能够加速微生物的代谢和生长,促进细胞产生分泌物^[34]。但CW-2处理下,蛋白质浓度显著增加,表明高电压刺激增大了细胞膜表面孔隙,甚至破坏细胞膜,使得细胞内物质泄漏,反应器溶液中蛋白质浓度增加,最终可能导致微生物死亡。

2.3.4 外加电压对微生物群落多样性的影响

表2描述了人工湿地系统微生物的多样性和丰富度。由表可知,与对照组相比CW-0.5和CW-1处理下Shannon、Chao、Ace和Shannoneven指数增加,表明适宜电压对反应器内微生物丰富度和多样性起到正向作用;而在CW-2处理下微生物的均匀度、丰富度和多样性均下降,表明施加2V电压对微生物胁迫增大,导致部分耐受能力弱的微生物死亡。

3 结论

(1)施加电压为0.5V和1V时,能够促进李氏禾生长发育,表现为叶绿素含量增加。施加电压为2V

表2 施加不同电压下人工湿地系统微生物α多样性指数

Table 2 Microbial α diversity index of constructed wetland system under different voltage

处理 Treatments	Shannon	Chao	Ace	Simpson	Shannoneven
CW-0	4.37	1 105.26	1 109.32	0.04	0.63
CW-0.5	4.42	1 166.87	1 154.85	0.05	0.64
CW-1	4.63	1 200.23	1 199.34	0.04	0.69
CW-2	4.00	1 024.36	1 031.04	0.07	0.59

时,MDA含量增加,植物生长受到抑制。李氏禾通过提高SOD、POD和CAT的活力以及增加可溶性蛋白的浓度来缓解电压胁迫对植物体造成的毒害。

(2)水力停留时间为2 d,施加电压为1 V时,COD、 NH_4^+-N 、TN和TP的去除率分别可达95.2%、92.5%、85.9%和98.2%;相较于0 V对照组分别提高了9.3%、6.9%、10.3%和5.3%,表明适宜电压可提高污染物的去除率。

(3)施加电压为0.5 V和1 V时,ATP含量增加,微生物代谢加快,丰富度和多样性增加,污染物去除率提高;施加电压为2 V时,LDH和蛋白质含量显著降低,微生物活性受到抑制,均匀度、丰富度和多样性均减少,污染物去除率降低。

参考文献:

- [1] Xu S, Zhou S, Xing L, et al. Fate of organic micropollutants and their biological effects in a drinking water source treated by a field-scale constructed wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 682(10):756-764.
- [2] Flores L, Garcia J, Pena R, et al. Constructed wetlands for winery wastewater treatment: A comparative Life Cycle Assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659:1567-1576.
- [3] 成水平, 王月圆, 吴娟. 人工湿地研究现状与展望[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6):1489-1498. CHENG Shui-ping, WANG Yue-yuan, WU Juan. Advance and prospect in the studies on constructed wetlands[J]. *J Lake Sci*, 2019, 31(6):1489-1498.
- [4] Yadav A K, Dash P, Mohanty A, et al. Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47:126-131.
- [5] Si Z, Wang Y, Song X, et al. Mechanism and performance of trace metal removal by continuous-flow constructed wetlands coupled with a micro-electric field[J]. *Water Research*, 2019, 164(1):114937-114948.
- [6] Dannehl D. Effects of electricity on plant responses[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 234(14):382-392.
- [7] He R, Xi G, Liu K. Alleviating effect of extremely low frequency pulsed electric field on drought damage of maize seedling roots[J]. *Journal of Luminescence*, 2017, 188:441-447.
- [8] Li Z G, Gou H Q, Li R Q. Electrical stimulation boosts seed germination, seedling growth, and thermotolerance improvement in maize (*Zea mays* L.)[J]. *Plant Signal Behav*, 2019, 14(12):1681101.
- [9] Elnaker N A, Hasan S W, Yousef A F. Impact of current density on the function and microbial community structure in electro-bioreactors[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 368(15):877-884.
- [10] Ju X, Wu S, Zhang Y, et al. Intensified nitrogen and phosphorus removal in a novel electrolysis-integrated tidal flow constructed wetland system[J]. *Water Research*, 2014, 59(1):37-45.
- [11] Zeyoudi M, Altenajji E, Ozer L Y, et al. Impact of continuous and intermittent supply of electric field on the function and microbial community of wastewater treatment electro-bioreactors[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 181(1):271-279.
- [12] Gao Y, Xie Y W, Zhang Q, et al. Intensified nitrate and phosphorus removal in an electrolysis-integrated horizontal subsurface-flow constructed wetland[J]. *Water Research*, 2017, 108(1):39-45.
- [13] 王皓, 钱琪卉, 丁瑞睿, 等. 电解强化人工湿地对农村生活污水中氮磷的去除性能[J]. 环境工程学报, 2021, 15(3):1006-1015. WANG Hao, QIAN Qi-hui, DING Rui-rui, et al. Performance of electrolysis enhanced constructed wetland system on nitrogen and phosphorus removal of rural domestic sewage[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(3):1006-1015.
- [14] 邓明明, 刘济明, 文爱华, 等. 遮阴对米槁幼苗光合生理指标的影响[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2019, 43(3):89-96. DENG Ming-ming, LIU Ji-ming, WEN Ai-hua, et al. Effect of shading on photosynthetic physiological responses of the medicinal plant *Cinnamomum migao*[J]. *Journal of Anhui University (Natural Science Edition)*, 2019, 43(3):89-96.
- [15] 葛依立, 陈心胜, 黄道友, 等. 湿地植物水蓼(*Polygonum hydropiper* L.)对镉的富集特征及生理响应[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(2):190-200. GE Yi-li, CHEN Xin-sheng, HUANG Dao-you, et al. Accumulation characteristics and physiological responses of the wetland plant, *Polygonum hydropiper* L. to cadmium[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, 15(2):190-200.
- [16] 李佳, 曹先梅, 刘立云. 镁对槟榔幼苗光合特性和叶绿体超微结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11):1949-1956. LI Jia, CAO Xian-mei, LIU Li-yun. Effects of different magnesium nutrition levels on photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of areca palm seedlings[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(11):1949-1956.
- [17] 张松贺, 袁树东, 韩冰. 自然河道中沉水植物苦草对水流的生理响应[J]. 水资源保护, 2018, 34(3):96-103. ZHANG Song-he, YUAN Shu-dong, HAN Bing. Physiological response of *Vallisneria spiralis* to water flow in wild river[J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(3):96-103.
- [18] 肖泽华, 李欣航, 潘高, 等. 锰胁迫对黄花草种子萌发及幼苗生理生化特征的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(12):75-84. XIAO Ze-hua, LI Xin-hang, PAN Gao, et al. Effects of manganese stress on seed germination, and seedling physiological and biochemical characteristics of *Cleome viscosa*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(12):75-84.
- [19] 孙思淼, 常伟, 宋福强. 丛枝菌根真菌提高盐胁迫植物抗氧化机制的研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(10):3589-3596. SUN Si-miao, CHANG Wei, SONG Fu-qiang. Mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi improve the oxidative stress to the host plants under salt stress: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(10):3589-3596.
- [20] Kim Y H, Khan A L, Waqas M, et al. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A review[J]. *Frontiers Plant Science*, 2017, 8:510-517.
- [21] Zhao X H, Liu H, Xiao J, et al. A comparative study of the physiological and biochemical properties of tomato (*Lycopersicon esculentum*

- M.) and maize (*Zea mays* L.) under palladium stress[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 705:135938.
- [22] 陈洁, 张松贺, 龚莉雪, 等. 沉水植物狐尾藻对污水厂尾水的生理响应[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2020, 44(5):100-108. CHEN Jie, ZHANG Song-he, GONG Li-xue, et al. Physiological response of *Myriophyllum verticillatum* to effluents of sewage treatment plant[J]. *Journal of Anhui University (Natural Science Edition)*, 2020, 44(5):100-108.
- [23] Lin H, Lin Y, Liu L. Treatment of dinitrodiazophenol production wastewater by Fe/C and Fe/Cu internal electrolysis and the COD removal kinetics[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, 58:148-154.
- [24] 郑晓英, 朱星, 周翔, 等. 铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果[J]. 环境科学, 2017, 38(6):2412-2418. ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, et al. Removal of nitrogen in municipal secondary effluent by a vertical flow constructed wetland associated with iron-carbon internal electrolysis[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(6):2412-2418.
- [25] 何媛, 王宇晖, 宋新山. 电极强化人工湿地处理污水脱氮的效果[J]. 环境工程学报, 2016, 10(9):4867-4872. HE Yuan, WANG Yu-hui, SONG Xin-shan. Wastewater denitrification by construct wetlands with electrode intensification[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(9):4867-4872.
- [26] 钟乐, 夏磊, 丁杰. 电解强化人工湿地处理低碳氮比污水的效能及机制[J]. 环境科学学报, 2020, 40(10):3590-3597. ZHONG Le, XIA Lei, DING Jie. Efficiency and mechanism on low C/N ratio sewage treatment by electrolysis-integrated constructed wetland[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(10):3590-3597.
- [27] Vymazal J, Kröpfelová L. Multistage hybrid constructed wetland for enhanced removal of nitrogen[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 84:202-208.
- [28] 陈旭, 张璐. 生物炭基质潮汐流人工湿地处理生活污水性能[J]. 生态环境学报, 2019, 28(7):1443-1449. CHEN Xu, ZHANG Lu. Treatment of domestic wastewater in biochar-packed tidal flow constructed wetland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(7):1443-1449.
- [29] 范军辉, 郝瑞霞, LIU Lei, 等. SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷途径及微生物群落特性[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4):160-167. FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LIU Lei, et al. Way of nitrogen and phosphorus removal and microbial community characteristics for SC-SC-S/Fe[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(4):160-167.
- [30] Ding A, Yang Y, Sun G, et al. Impact of applied voltage on methane generation and microbial activities in an anaerobic microbial electrolysis cell (MEC)[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 283:260-265.
- [31] Loghavi L, Sastry S K, Yousef A E. Effect of moderate electric field frequency and growth stage on the cell membrane permeability of *Lactobacillus acidophilus*[J]. *Biotechnol Prog*, 2010, 25(1):85-94.
- [32] Mycielska M E, Djamgoz M B. Cellular mechanisms of direct-current electric field effects: Galvanotaxis and metastatic disease[J]. *J Cell Sci*, 2004, 117(9):1631-1639.
- [33] Qu F, Liang H, He J, et al. Characterization of dissolved extracellular organic matter (dEOM) and bound extracellular organic matter (bEOM) of *Microcystis aeruginosa* and their impacts on UF membrane fouling[J]. *Water Research*, 2012, 46(9):2881-2890.
- [34] Wang K, Sheng Y, Cao H, et al. Impact of applied current on sulfate-rich wastewater treatment and microbial biodiversity in the cathode chamber of microbial electrolysis cell (MEC) reactor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 307:150-158.