

# 人工湿地去除畜禽养殖废水污染物研究进展

张燕<sup>1</sup> 伏春燕<sup>1</sup> 阎佩佩<sup>1</sup> 李新华<sup>2</sup> 董红云<sup>2</sup> 吴家强<sup>1</sup>  
阎百兴<sup>3</sup> 石天虹<sup>1</sup> 刘雪兰<sup>1\*</sup>

(1. 山东省农业科学院 家禽研究所, 济南 250023;

2. 山东省湿地生态农业工程实验室 山东省农业可持续发展研究所, 济南 250100;

3. 中国科学院 湿地生态与环境重点实验室/东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

**摘要** 为研究人工湿地在畜禽养殖废水中处理污染物的现状,以“人工湿地”、“畜禽养殖废水或污水”、“畜禽养殖污染”、“营养物质”、“重金属”、“抗生素”和“抗生素基因”等为关键词,搜索 ISI web of knowledge、SpringerLink、中国知网、万方数据库等数据库,对2007—2020年发表的相关文献进行归纳和分析。结果表明:1)人工湿地能有效去除畜禽养殖废水中营养物质、重金属、抗生素及 ARGs 等;2)人工湿地在畜禽养殖废水中的应用尚处于发展阶段,且具有较可观的应用前景,但其去除污染物的机理仍需要深入探;3)研究发现人工湿地综合去除畜禽养殖废水中的污染物能力以及评价人工湿地运行效能是今后的研究发展方向。本研究可为人工湿地处理畜禽养殖废水提供理论参考。

**关键词** 畜禽养殖; 废水污染; 人工湿地; 营养物质; 重金属; 抗生素

中图分类号 X703 文章编号 1007-4333(2021)04-0192-09 文献标志码 A

## Research progress on pollutant removal from livestock and poultry breeding wastewater by constructed wetlands

ZHANG Yan<sup>1</sup>, FU Chunyan<sup>1</sup>, YAN Peipei<sup>1</sup>, LI Xinhua<sup>2</sup>, DONG Hongyun<sup>2</sup>, WU Jiaqiang<sup>1</sup>,  
YAN Baixing<sup>3</sup>, SHI Tianhong<sup>1</sup>, LIU Xuelan<sup>1\*</sup>

(1. Poultry Institute, Shandong Academy of Agricultural Science, Jinan 250023, China;

2. Shandong Engineering Laboratory of Wetland and Eco-Agriculture, Shandong Institute of Agricultural Sustainable Development, Jinan 250100, China;

3. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment/Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

**Abstract** To understand the current progress of researches on the application of constructed wetlands to decontaminate wastewater from livestock and poultry breeding, “constructed wetlands”, “livestock and poultry breeding wastewater”, “pollution from livestock and poultry”, “nutrient elements”, “heavy metal”, “antibiotics” and “antibiotics resistance genes” were taken as keywords. The relevant literature published from 2007 to 2020 were searched by using databases including ISI web of knowledge, SpringerLink, China National Knowledge Internet, Wanfang Database, summarized and analyzed. The results showed as follows: 1) Constructed wetlands can effectively remove nutrients, heavy metals, antibiotics and antibiotics resistance genes (ARGs) in livestock and poultry breeding

收稿日期: 2020-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501520);山东省农业科学院创新工程项目(CXGC2016A08);山东省农业科学院青年科研基金(2016YQN52);家禽研究所学科团队建设(CXGC2018E11);山东省现代农业产业技术体系家禽创新团队建设(SDAIT-11-06)

第一作者: 张燕,副研究员,主要从事水环境污染与防治研究,E-mail:swallow928@126.com

通讯作者: 刘雪兰,研究员,主要从事畜禽营养与污染防治,E-mail:jqliuxl@163.com

wastewater; 2) The application of constructed wetlands for treating livestock and poultry breeding wastewater is still in the development stage, and they have considerable application prospect, but the removal mechanism of contaminants by constructed wetlands still needs further research; 3) It is also found that the comprehensive removal capacity of contaminants by constructed wetlands and evaluation of operational efficiency of constructed wetlands are research directions in the future. The research could provide theoretical reference for the application of constructed wetlands to treat livestock and poultry breeding wastewater.

**Keywords** livestock and poultry breeding; wastewater; constructed wetlands; nutrient elements; heavy metal; antibiotics

畜禽养殖废水中存在大量的硫化氢、氨态氮和粪臭素等臭味化合物,共有百余种,易污染空气,影响空气质量。畜禽养殖废水携带大量有机物、氮、磷、重金属、抗生素、致病菌等,进入下游水体后,导致水体中污染物含量升高,增加水体污染风险,进而影响人类健康。已有研究表明废水中有毒有害有机物和重金属等进入地下水,可造成地下水持久性有机物污染和影响;进入环境的抗生素不仅能抑制部分微生物的生长,改变环境微生物的群落结构及其生态功能,还能影响植物生长,对动物和人体产生毒害作用<sup>[1]</sup>。高浓度养殖废水灌溉农田或排入土壤可堵塞土壤空隙,降低土壤透气、透水性,导致土壤板结、土壤质量下降<sup>[2-3]</sup>。当高浓度养殖废水中的重金属进入土壤中,可致重金属在土壤中大量积累,进而改变土壤性质及物理特性,影响土壤营养元素的供应及植物的营养吸收和利用,易造成其养分缺乏,也影响了土壤酶活性、微生物的群落结构、种群增长特征以及生理生化和遗传特征<sup>[4]</sup>。因此畜禽养殖废水的不合理排放或利用,可对空气、水体和土壤造成严重危害,打破农田生态系统平衡,破坏区域生态环境与水环境水质安全。目前,由于饲养规模及生产布局与消纳土地不配套,导致大量畜禽粪便得不到及时消纳而大量积累,不仅因存储而占据土地资源,而且还产生大量恶臭气体,流出污水,加剧了养殖区及周边水环境污染。

随着我国畜禽养殖业的规模化、集约化不断发展,畜禽粪便和废水的产生量呈快速增长趋势。据农业农村部数据显示,我国每年产生 38 亿 t 畜禽粪便和废水,仅 2015 年我国畜禽养殖产生废水 26.33 亿 t,但其综合利用率却不到 60%<sup>[5-6]</sup>。2007 年畜禽养殖废水中铜(Cu)2 397.23 t,锌(Zn)4 756.94 t,分别占农业污染源排放总量的 97.8%和 97.8%;2017 年畜禽养殖废水中化学需氧量(COD)达 1 000.53 万 t,氨态氮(NH<sub>3</sub>)达 11.09 万 t,总氮(TN)达 59.63 万 t,总磷(TP)达 11.97 万 t,分别占

农业污染源排放总量的 93.76%、51.30%、42.14%和 56.46%<sup>[7-8]</sup>。畜禽养殖业已成为我国农业面源污染的重要来源。我国每年抗生素产量约为 21.0 万 t,其中 9.7 万 t 用于畜牧养殖业,而用于养殖业的抗生素大都不能被动物机体充分吸收,其通过母体化合物或代谢产物的形式随着粪便和尿液排出体外,并随废水进入水环境或土壤中<sup>[9]</sup>。由于畜禽养殖业属于低利润行业,即使配有相应的粪污处理设施,但因其维护管理费用高、运行成本高、缺乏相关技术人员等原因,致使粪污处理设施难以长期正常运行,导致畜禽养殖废水未得到有效处理而排入周边水体,造成农业区域环境污染<sup>[10-11]</sup>。因此探索污染物去除率高、运行成本低、建造成本符合养殖业低利润水平的处理技术,将是畜禽养殖业污染防治技术的重点。

目前我国虽然已有的人工湿地处理畜禽养殖废水方面的研究,但是缺乏全面、系统的归纳和分析。因此,为了解我国畜禽养殖废水污染及治理现状,本研究拟以“人工湿地”、“畜禽养殖废水或污水”、“营养物质”、“重金属”、“抗生素”、“抗生素基因抗性(ARGs)”等为主要关键词,搜索 ISI web of knowledge、SpringerLink、中国知网、万方数据库等数据库,对 2007—2020 年发表的相关文献进行归纳和分析,综述畜禽养殖废水处理现状及存在问题,并重点分析人工湿地去除废水中营养物质、重金属、抗生素及抗生素抗性基因等污染物的研究进展,探究人工湿地处理畜禽养殖废水的研究方向,以期对畜禽养殖污染治理提供有效的理论指导。

## 1 我国畜禽养殖废水处理研究现状与问题

2014 年国务院批复实施《畜禽规模养殖污染防治条例》<sup>[12]</sup>,该条例促进了养殖业调整畜禽粪污处理方式。2015 年国务院颁布《水污染防治行动计划》<sup>[13]</sup>,该计划的实施使畜禽养殖废水得到了有效的防控,例如畜禽养殖废水中 COD 和铵态氮

( $\text{NH}_4\text{-N}$ )等重点污染物总排放量分别减少 3.2% 和 4.8%。自 2014 年 8 月起,全国各省全面开展畜禽粪污专项整治行动,并依法完成了禁养区内畜禽养殖场(小区)和养殖专业户关闭或搬迁,使得全国畜禽养殖更加规模化、集约化,规模养殖场粪污处理设施装备配套率达到 80% 以上<sup>[14]</sup>。目前我国绝大多数畜禽养殖场配备了废水处理设施,如基于 A/O 法、 $\text{A}^2\text{O}$  法、SBR 法、膜生物法、UASB 等工程设施<sup>[15-16]</sup>。畜禽养殖废水富含高浓度的有机物、氮磷、重金属、抗生素和有害微生物,经过一定的工程处理后,虽能将大部分的有机物、悬浮物、氨氮、重金属等物质大量去除,使得养殖废水达到 GB18596—2001《国家畜禽养殖业污染物排放标准》<sup>[17]</sup>的要求,但仍有一些指标仍然超过 GB3838—2002《国家地表水环境质量标准》<sup>[18]</sup>的 V 类水质要求或 GB5084—2005《农田灌溉水质标准》<sup>[16]</sup>,因而其出水中化学需氧量、氨氮、重金属、抗生素等经常出现超标现象,致使农业区域地表水和地下水环境存在严重的污染风险。因此,对畜禽养殖废水进行后续处理(即深度处理)。

在不同深度处理方式中,人工湿地因其具有去污效果好、耐冲击负荷能力强、投资低、生态景观价值高等优点,被广泛应用在畜禽养殖废水处理上<sup>[19-21]</sup>。人工湿地不仅能有效缓冲畜禽养殖废水的高污染负荷冲击,还能有效去除污染物及病原体,减少畜禽养殖废水对农田和下游水体的危害<sup>[19]</sup>。

## 2 人工湿地去除畜禽养殖废水污染物的研究进展

人工湿地是由植物、基质、微生物和水体等 4 个基本要素构成的一个完整的生态系统,按照其系统内水体流态的不同,将其分为表面流人工湿地、水平潜流人工湿地和垂直潜流人工湿地等 3 大类。人工湿地对废水的净化机理是用系统中基质、植物、微生物的物理、化学、生物三重协同作用,通过过滤、吸附、沉淀、离子交换、络合反应、植物吸收和微生物分解来实现对废水的高效净化<sup>[22-23]</sup>。

### 2.1 去除废水中的营养物质

近年来世界各国针对人工湿地处理畜禽养殖废水展开了广泛的研究,并取得很好的效果<sup>[21]</sup>。为了提高人工湿地去除畜禽养殖废水中营养物质的功能,可通过优化湿地结构、改进运行参数、人工补给氧气、强化微生物作用、优选基质和植物、添加外源

调节剂等措施,来实现强化湿地系统去污效果<sup>[24-27]</sup>。畜禽养殖废水具有相对集中、间歇排放、成分复杂、碳氮比低、富含微量元素、可生化性高等特点。利用间歇排放,可以间歇性向人工湿地进水,有效实现人工湿地复氧,同时可以沉淀部分悬浮物等,一定程度上缓解了人工湿地运行过程中供氧不足、易堵塞等问题,也有利于植物生长及功能微生物代谢。

Pelissari 等<sup>[28]</sup>研究采用人工湿地处理奶牛场养殖废水发现:当 COD、总凯氏氮(TKN)和  $\text{NH}_4\text{-N}$  进水负荷率分别为 151.4、10.3 和 8.2  $\text{g}/(\text{m}^2\text{周})$  时,水平潜流人工湿地能去除 59% 的 TN 和 58% 的  $\text{NH}_4\text{-N}$ ;而利用垂直潜流人工湿地处理,COD、TKN 和  $\text{NH}_4\text{-N}$  进水负荷率分别为 317.2、21.6 和 13.7  $\text{g}/(\text{m}^2\text{周})$  的废水,能去除 23% 的 TN 和 80% 的  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,而且 73% 的  $\text{NH}_4\text{-N}$  是主要通过硝化作用完成的。由此可见,不同湿地类型去除氮的能力不同。与一般潜流人工湿地比较,改进的波形潜流人工湿地对 COD、TN 和  $\text{NH}_4\text{-N}$  的平均去除率提高均在 3% 以上,但对总磷(TP)去除效果相当<sup>[29]</sup>。Li 等<sup>[30]</sup>利用多阶表面流人工湿地处理养猪场废水,废水中 COD、TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  和 TP 平均进水浓度分别为 1443.2、746.2、630.8、4.1 和 82.2  $\text{mg}/\text{L}$ ,经过 32 d 的处理后,得到较高的去除效率,COD、TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、硝态氮  $\text{NO}_3\text{-N}$  和 TP 的去除率分别达到 89.8%、97.9%、98.2%、87.6% 和 96.4%。湿地基质和植物吸附和吸收氮素效率分别为 2.44 和 1.24  $\text{g}/(\text{m}^2\text{d})$ ,其中微生物作用是废水中氮去除主因,其贡献率为 56.75%~65.35%<sup>[31]</sup>。研究发现多阶表面流人工湿地比单阶表面流人工湿地处理废水效果好<sup>[32]</sup>。通过结合各种类型人工湿地优缺点,将不同类型人工湿地进行组合,应用于畜禽养殖废水处理也取得了较好的效果<sup>[33-34]</sup>。因此,多阶或多类型组合型人工湿地具有较优的应用前景。

Feng 等<sup>[35]</sup>处理养猪废水,研究结果显示,在不同进水强度下,COD 去除率为 63.06%~77.18%, $\text{NH}_4\text{-N}$  去除率为 87.19%~96.54%,TN 去除率为 40.83%~48.70%。但是直接供氧需要消耗动力能源,这增加了人工湿地运行和操作费用,因此通过改变进水方式来增加人工湿地系统的溶解氧之一的潮汐流作为新型间歇进水方式而被广泛关注。潮汐流人工湿地利用潮汐运行中床体浸润面变化产生的空隙吸力将大气氧吸入湿地基质或土壤空隙中,提高

人工湿地溶解氧含量<sup>[36]</sup>。也有研究利用潮汐流方式强化人工湿地处理厌氧消化畜禽养殖废水,能去除85.94%的COD、61.20%的NH<sub>4</sub>-N和57.41%的TN<sup>[37]</sup>,有效提高了人工湿地去除畜禽养殖废水中污染物的能力。另外,通过生物再生沸石强化潮汐流人工湿地处理畜禽养殖废水,结果显示其对COD、NH<sub>4</sub>-N和TN的去除率分别为84.75%、74.13%和67.13%<sup>[38]</sup>。因此,添加生物再生沸石虽然对COD的去除影响不大,却提高了湿地系统的脱氮能力。Du等<sup>[39]</sup>利用斜发沸石强化垂直潜流人工湿地处理养猪废水的研究发现人工湿地系统去除总氨氮的能力为96.1%,比石英砂人工湿地系统提高了29.6%,其中沸石吸附去除达93.01%,而且大大减少了湿地系统氨气挥发。

为了解决畜禽养殖废水碳氮比低的问题,在人工湿地处理畜禽养殖废水时,添加稻草秸秆作为外源碳源,不仅提高了人工湿地碳源,促进了微生物的反硝化作用,增加了人工湿地硝化微生物和反硝化微生物的丰富度,而且有效减少人工湿地处理高强度畜禽养殖废水过程中37.2%~43.7%的N<sub>2</sub>O释放量<sup>[40]</sup>。然而将高温制作的生物炭作为碳源添加到曝气人工湿地中,却明显降低了畜禽养殖废水中TN的去除能力,而且还增加了人工湿地系统释放N<sub>2</sub>O的量,在高进水强度下其释放流量为185.43~443.33 μg/(m<sup>2</sup>h)<sup>[35]</sup>。这说明添加生物炭改进人工湿地的应用,不仅要考虑其去污能力,还要关注人工湿地系统释放N<sub>2</sub>O的潜在问题。

改善人工湿地中溶解氧条件,可为微生物的硝化、反硝化作用提供适宜环境,从而加快污染物的降解。已有研究利用生物燃料电池强化人工湿地系统或在其基础上,利用生物质炭吸附作用、还原作用、增设回流等其他措施,增强硝化、反硝化能力,能够提高出水水质<sup>[41]</sup>。生物燃料电池是一种将化学能转化为电能的新型技术,能同时产电和降解难降解的污染物,人工湿地系统与生物燃料电池具有相似之处。通过结合各自优点,研制了人工湿地复合生物燃料电池技术,该水处理技术是在湿地系统和产电系统中共同完成的<sup>[41]</sup>。Liu等<sup>[42]</sup>通过生物燃料电池-人工湿地(MFC-CW)处理养猪废水发现,湿地植物能促进湿地系统生物电输出,不同植物配置的MFC-CW去除污染能力不同,其中无植物、美人蕉、菖蒲和空心菜湿地对COD的去除率分别为

80.20%、88.07%、84.07%和82.20%,对NH<sub>4</sub>-N的去除率分别为49.96%、75.02%、70.25%和68.47%,通过对比可以看出美人蕉植物配置MFC-CW具有较好的处理效果。另外,研究发现粉绿狐尾藻能从畜禽养殖废水中高效去除NH<sub>4</sub>-N,而且具有较强的抗逆性和耐受性,被应用在人工湿地处理畜禽养殖废水上<sup>[43-44]</sup>。芦苇植物也具有抗逆性和耐受性,且生物量和根系庞大,能直接吸收利用氮、磷、有机物等污染物<sup>[34]</sup>。目前有关人工湿地处理畜禽养殖废水植物的研究,仅关注单一植物的研究,多种植物组合配置人工湿地的研究鲜有报道。

## 2.2 去除废水中的重金属

人工湿地对重金属的去除机理主要有沉淀、植物和微生物吸收等,其中沉淀是最主要的方式<sup>[45]</sup>。不同重金属去除效果存在差异。畜禽养殖废水中重金属以铜、锌等为主,因此人工湿地对畜禽养殖废水重金属的处理主要集中在Cu和Zn的去除研究上。人工湿地处理含Cu和Zn分别为8.63和44.02 mg/L的废水,运行45 d后,宽叶香蒲和沼泽蕨对铜的平均吸收量为47.54和105.58 mg/L,对锌的平均吸收量分别为271.64和409.26 mg/L<sup>[46]</sup>。Almeida等<sup>[47]</sup>利用芦苇人工湿地处理畜禽养殖废水,人工湿地对废水中Cu、Zn、Fe和Mn的去除率分别为85%、89%、99%和75%,且运行22周后,人工湿地对其去除效果基本保持平稳。由此可见,人工湿地植物对水体中重金属去除具有重要作用,不仅能直接吸收利用重金属元素,还能通过根系及其根系分泌物吸附、沉淀和富集一些重金属<sup>[48]</sup>。人工湿地植物如香蒲、芦苇等丰富的根系可为湿地沉淀区创造有利于重金属去除途径的环境条件<sup>[48]</sup>。然而,在人工湿地运行初期,湿地植物、微生物还处于适应期,湿地基质仅能过滤截留部分重金属;随着运行时间的推移,植物、微生物适应了重金属的胁迫,提高了湿地系统对重金属的去除能力;但是运行后期由于湿地系统积累过量的重金属,抑制了植物和微生物的生存,进而影响湿地对重金属的去除能力<sup>[45]</sup>。因此,需要改进人工湿地运行机制,并通过更新植物或刈割植物的方式,提升湿地系统对重金属去除能力。

重金属和有限的植物吸收利用是降低人工湿地去除畜禽养殖废水中磷效果的主要原因<sup>[50]</sup>。重金属存在影响人工湿地对营养物质的去除。重金属元素因毒性大、难降解,被湿地植物吸收引致富集,影响植物体生理生化过程,对植物生长产生毒害。研

究发现重金属对沼泽蕨生长的影响明显高于宽叶香蒲,两者植物均能用于处理畜禽养殖废水,而且他们体内积累 Cu、Zn 的量与水体中 Cu、Zn 减少量有关,Cu、Zn 盐能诱导植物细胞壁重构和碳水化合物代谢变化,从而影响植物对水中污染物的去除效果<sup>[46-47]</sup>。湿地植物通过积累游离态脯氨酸、丙二醛,增强超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性等方式来增强自身的防御系统,用来抵御畜禽养殖废水中铜、锌对其造成的伤害<sup>[51]</sup>。目前我国有关人工湿地处理畜禽养殖废中重金属的研究仅局限在实验室研究,在实际应用的研究尚少。

### 2.3 去除废水中的抗生素及抗生素抗性基因

兽用抗生素广泛用于预防和治疗动物疾病,畜禽养殖饲料中常见添加抗生素有四环素类、磺胺类、喹诺酮类、大环内酯类等。抗生素被生物体利用的较少,导致畜禽养殖粪污中多种抗生素残留,影响养殖区水环境。对中国、美国、德国、捷克等国家的畜禽养殖区水体检测结果证实水中抗生素主要来源于畜禽粪便及养殖场排放的养殖废水<sup>[5,52]</sup>。

人工湿地去除畜禽养殖废水中兽用抗生素的能力主要与抗生素自身的理化性质有关,同时人工湿地的结构也影响其去除能力。养猪废水中兽用抗生素进水浓度相似的情况下,表面流人工湿地对磺胺甲噁唑和四环素的去除率分别为 40%和 92%;水平潜流人工湿地对这两者的去除率分别为 59%和 92%;垂直潜流人工湿地对两者的去除率分别为 87%和 99%<sup>[53]</sup>。可见垂直潜流人工湿地能高效去除磺胺甲噁唑和四环素,而且由于两者的理化性质差异,使得人工湿地对四环素的去除能力优于磺胺甲噁唑。人工湿地基质也影响畜禽养殖废水中抗生素去除效果。人工湿地土壤基质去除畜禽养殖废水中抗生素能力显著高于其它湿地基质,尤其是富含粘土质的土壤,由于其具有较大的比表面积和较高的表面能,能吸附更多的抗生素<sup>[54]</sup>。Liu 等<sup>[55]</sup>分别采用火山石和沸石填充垂直潜流人工湿地,处理经过厌氧反应器处理后的养猪废水,发现火山石人工湿地对环丙沙星、土霉素和磺胺甲噁唑的去除率分别为 82%、91%和 68%,而沸石人工湿地对其去除率分别为 85%、95%和 73%。由此可见,沸石填充的垂直潜流人工湿地优于火山石填充,而且由于 3 种抗生素理化性质不同,人工湿地对它们的去除能力大小依次为:土霉素>环丙沙星>磺胺甲噁唑。对比砂子,沸石基质吸附畜禽养殖废水中抗生素的

效果较优,而且沸石和湿地植物耦合可强化垂直潜流人工湿地去除畜禽养殖废水中抗生素和其抗性基因能力,其综合去除能力分别达到 95.0%和 95.1%<sup>[56]</sup>。另有一些研究认为人工湿地植物对畜禽养殖废水中抗生素去除效果的影响却不明显。Carvalho 等<sup>[57]</sup>通过微型人工湿地处理畜禽养殖废水中抗生素的研究发现,种植和未种植芦苇的人工湿地对抗生素的去除效果没有明显差异。Du 等<sup>[56]</sup>发现芦竹植物对沸石人工湿地处理养猪废水中抗生素的去除效果影响也较小。也有研究认为植物在抗生素迁移和降解中起到重要作用<sup>[58]</sup>。芦苇植物具有去除水体中 3 种兽用抗生素(头孢噻唑、恩诺沙星和四环素)的潜力,说明芦苇人工湿地可应用于畜禽养殖废水处理<sup>[59]</sup>。有关人工湿地植物对畜禽养殖废水中抗生素的去除机理尚存在争议,仍需要进一步研究。

畜禽养殖废水中抗生素导致人工湿地基质微生物多样性减少,却能促进人工湿地系统 ARGs 的生长<sup>[60-61]</sup>。张子扬等<sup>[62]</sup>通过对人工湿地去除畜禽养殖废水中磺胺类 ARGs 的研究发现,畜禽养殖废水中的 3 种磺胺类 ARGs 中的 sul I、sul II 和 sul III 的平均去除率分别为 89%、88%和 84%,且运行结束后,湿地基质中的 sul I、sul II 和 sul III 的绝对拷贝数和相对表达量均有显著增加。同时湿地基质也影响畜禽养殖废水中 ARGs 的去除。Liu 等<sup>[60]</sup>发现火山石填充的垂直潜流人工湿地对养猪废水中四环素 ARGs 的 tetW、tetM 和 tet(O)的去除率达到 50%,而经过沸石填充的垂直潜流人工湿地处理后出水中他们的浓度降低了一个数量级。在无植物种植的人工湿地处理畜禽养殖废水研究中发现,沸石人工湿地去除 ARGs (tet(W)、tet(O)、tet(M)、sul(I)、sul(II)、和 sul(III))的能力(95.3%)与砂子人工湿地(93.3%)的去除能力相当;在有植物的人工湿地系统中,沸石人工湿地去除 ARGs 的能力(95.1%)远高于砂子人工湿地(71.7%)<sup>[56]</sup>。上述结果说明人工湿地不同基质与植物耦合对畜禽养殖废水中抗生素的去除机理存在差异,吸附性强的基质更有利于 ARGs 的去除,因此有必要对不同类型的基质和植物进行优化筛选,强化其对抗生素及其 ARGs 的去除能力。

目前,人工湿地对抗生素的去除机理尚不明了,一般认为基质吸附和生物降解是人工湿地去除畜禽养殖废水中抗生素的主要途径<sup>[60,63]</sup>。人工湿地对

畜禽养殖废水中微生物的去除可能是导致抗生素抗性基因(ARGs)减少的主要原因,所以 ARGs 的去除机理应该与废水微生物在人工湿地中的去除机理有关<sup>[5]</sup>。废水中微生物在人工湿地的去除主要通过植物、基质、微生物等组分的物理、化学、生物过程来完成的<sup>[64]</sup>。目前针对畜禽养殖废水中微生物的去除效果研究尚缺乏。此外,近年来针对人工湿地处理畜禽养殖废水中抗生素的研究仅局限在微型模拟研究或实验室研究,而且研究多是根据畜禽养殖废水水质进行人工调配,与实际畜禽养殖废水存在差异。因此,需要针对畜禽养殖废水本身进行处理,深入研究其去除机理。

### 3 结 论

畜禽养殖废水富含多种有害物质和病原体,是自然环境重要污染源,有效的治理能使畜牧业可持续发展。人工湿地作为生态友好型处理方式,是畜禽养殖废水深度处理或直接处理的重要选择,能有效去除畜禽养殖废水中营养物质、重金属、抗生素及 ARGs 等。人工湿地在我国起步较晚,尤其是在畜禽养殖废水中的应用尚处于发展阶段,其作为低能耗、低投入、绿色生态技术,在畜禽养殖废水的应用前景可观,但仍需要深入探究其去污机理,尤其是对抗生素等的去除能力。去除畜禽养殖废水中的污染物以及精确评价综合运用人工湿地运行效能是今后的研究方向。

### 参考文献 References

[1] 韩杰,于宁,杨群辉.家禽养殖的废弃物污染及调控措施[J]. 养禽与禽病防治, 2009(5): 30-32  
Han J, Yu N, Yang Q H. Waste pollution and control measures of poultry farming[J]. *Poultry Raising and Disease Control*, 2009(5): 30-32 (in Chinese)

[2] Rusan M J M, Hinnawi S, Rousan L. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters[J]. *Desalination*, 2007, 215: 143-152

[3] 程绍明,马杨晖,姜雄晖.我国畜禽粪便处理利用现状及展望[J]. 农机化研究, 2009(1): 222-22  
Cheng S M, Ma Y H, Jiang X H. Comprehensive utilization technologies of livestock manure[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009(1): 222-22 (in Chinese)

[4] 宋志政,周润声.我国重金属污染土壤的治理与修复研究进展[J]. 资源与环境, 2020, 46(2): 216-217  
Song Z Z, Zhou R S. Research progress in remediation and remediation of heavy metal contaminated soil in China[J].

*Resources and Environment*, 2020, 46(2): 216-217 (in Chinese)

[5] 武淑霞,刘宏斌,黄宏坤,雷秋良,王洪媛,翟丽梅,刘申,张英,胡钰.我国畜禽养殖粪污产生量及其资源化分析[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 103-111  
Wu S X, Liu H B, Huang H K, Lei Q L, Wang H Y, Zhai L M, Liu S, Zhang Y, Hu Y. Analysis on the amount and utilization of manure in livestock and poultry breeding in China [J]. *Chinese Engineering Science*, 2018, 20(5): 103-111 (in Chinese)

[6] 赵馨馨,杨春,韩振.我国畜禽粪污资源化利用模式研究进展[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2019(4): 4-7, 13  
Zhao X X, Yang C, Han Z. Research progress on the resource utilization mode of livestock and poultry feces waste in China [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2019(4): 4-7, 13 (in Chinese)

[7] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[EB/OL]. (2020-07-10). [http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qtjtjgb/qgqjtjgb/201002/t20100211\\_30641.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qtjtjgb/qgqjtjgb/201002/t20100211_30641.html)  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of People's Republic of China. Bulletin of the first national pollution source census [EB/OL]. (2020-07-10). [http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qtjtjgb/qgqjtjgb/201002/t20100211\\_30641.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qtjtjgb/qgqjtjgb/201002/t20100211_30641.html) (in Chinese)

[8] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部. 第二次全国污染源普查公报[EB/OL]. (2020-07-10). [http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/202006/t20200610\\_783547.html](http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html)  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of People's Republic of China. Bulletin of the second national pollution source census [EB/OL]. (2020-07-10). [http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/202006/t20200610\\_783547.html](http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html) (in Chinese)

[9] 庄榆佳,侯梅芳,耿春女.畜禽养殖废水中抗生素和抗性基因的去除技术进展[J]. 上海应用技术学院学报:自然科学版, 2016, 16(2): 117-123  
Zhuang Y J, Hou M F, Geng C N. A Review on treatment technologies of antibiotics and its resistance genes in livestock wastewater[J]. *Journal of Shanghai Institute of Technology: Natural Science Edition*, 2016, 16(2): 117-123 (in Chinese)

[10] 纪玉琨,何洪,杨博琼,薛念涛.我国畜禽养殖污染防治管理措施研究. 黑龙江畜牧兽医, 2015(2): 103-106  
Ji Y K, He H, Yang B Q, Xu N T. Research on pollution prevention and control measures of Livestock and poultry breeding in China [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2015(2): 103-106 (in Chinese)

- [11] 吴志勇,叶华,甄丽卿,丁君辉,易松强,余峰,李珍. 江西省生猪养殖污染防治情况的调研报告[J]. 江西农业, 2020(2): 15  
An investigation report on pollution prevention and control of pig breeding in Jiangxi Province [J]. *Jiangxi Agriculture*, 2020(2): 21-25 (in Chinese)
- [12] 国务院. 畜禽规模养殖污染防治条例[EB/OL]. (2020-09-12). [http://www.gov.cn/zwggk/2013-11/26/content\\_2534836.htm](http://www.gov.cn/zwggk/2013-11/26/content_2534836.htm)  
The State Council. Regulations on the prevention and control of pollution from large-scale livestock and poultry breeding. [EB/OL]. (2020-09-12). [http://www.gov.cn/zwggk/2013-11/26/content\\_2534836.htm](http://www.gov.cn/zwggk/2013-11/26/content_2534836.htm) (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国生态环境部. 2015年环境统计年报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2017  
Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China. Annual report of environmental statistics in 2015 [R]. Beijing: Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China, 2017 (in Chinese)
- [14] 中国畜牧兽医年鉴编辑委员会. 中国畜牧兽医年鉴 2018[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018  
Editorial Committee of China Animal Husbandry and Veterinary Yearbook. *China Animal Husbandry and Veterinary Yearbook in 2018*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018 (in Chinese)
- [15] 唐凯. 国内畜禽养殖废水处理技术的研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(10): 2274-2278  
Tang K. Research progress in domestic livestock and poultry wastewater treatment technology [J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(10): 2274-2278 (in Chinese)
- [16] Luo Z, Wang D, Yang J, Huang H, Su G. The effect of fermented superphosphate pretreatment and step-feed mode on biological denitrification of piggery wastewater[J]. *Science of the Total Environment*, 2019(665): 724-730
- [17] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB 18596—2001, 畜禽养殖业污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.  
State Environmental Protection Administration, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of People's Republic of China. GB 18596—2001. Discharge standard of pollutants for livestock and poultry breeding[S]. Beijing: Standards Press of China, 2001 (in Chinese)
- [18] GB 3838—2002. 地表水环境质量标准[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002  
GB 3838—2002. Environmental standards for surface water [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002 (in Chinese)
- [19] 颜明娟,方志坚,翁珀琦,陈子聪,林诚,张辉. 应用人工湿地的技术对净化奶牛场废水的研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(12): 1992-1997  
Yan M J, Fang Z J, Weng B Q, Chen Z C, Lin C, Zhang H. Studies on the decontamination of dairy farm sewage by constructed wetland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(12): 1992-1997 (in Chinese)
- [20] 张燕,刘雪兰,王月明,井庆川,石天虹,武彬,阎佩佩,刘瑞亭,魏祥法. 中国规模化畜禽养殖污水处理中人工湿地的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(1): 87-92  
Zhang Y, Liu X L, Wang Y M, Jing Q C, Shi T H, Wu B, Yan P P, Liu R T, Wei X F. Research progress of constructed wetland treating intensive livestock and poultry wastewater in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(1): 87-92 (in Chinese)
- [21] 周胜,刘长娥,张继宁. 人工湿地处理畜禽养殖废水的研究与展望[J]. 上海农业学报, 2017, 33(2): 154-160  
Zhou S, Liu C E, Zhang J N. Research and prospect of livestock wastewater treatment using constructed wetlands [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2017, 33(2): 154-160 (in Chinese)
- [22] Liu H, Hu Z, Zhang J, Ji M, Zhuang L, Nie L, Liu Z. Effects of solids accumulation and plant root on water flow characteristics in horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 120: 481-486
- [23] Zhang Y, Liu X, Fu C, Li X, Yan B, Shi T. Effect of Fe<sup>2+</sup> addition on chemical oxygen demand and nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. *Chemosphere*, 2019, 220: 259-265
- [24] 黄杉,怀静,吴娟,钟非,成水平. 碳源补充促进人工湿地脱氮研究进展[J]. 水处理技术, 2018, 44(1): 13-16  
Huang S, Huai J, Wu J, Zhong F, Cheng S S. Research progress of nitrogen removal promotion in constructed wetland system by carbon addition [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(1): 13-16 (in Chinese)
- [25] 嵇斌,康佩颖,卫婷,常雅婷,乔尚,赵亚. 寒冷气候下人工湿地中氮素的去除与强化[J]. 中国给水排水, 2019, 35(16): 35-40  
Ji B, Kang P Y, Wei T, Chang Y T, Qiao S, Zhao Y. Removal and enhancement of nitrogen in constructed wetlands in cold climate: A review[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(16): 35-40 (in Chinese)
- [26] 童伟军,郑文萍,马琳,张义,贺锋,吴振斌. 不同生物促生剂添加量对垂直流人工湿地水质净化效果的影响[J]. 水生生物学学报, 2019, 43(2): 431-438  
Tong W J, Deng W P, Ma L, Zhang Y, He F, Wu Z B. The impact of different amount biostimulants supplement on the performance of water purification in vertical flow constructed wetland[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(2): 431-438 (in Chinese)
- [27] Yin X, Zhai J, Hu W, Li Y, Rahaman M H, Maĳinia J. A fast start-up of the organotrophic anammox process inoculated with constructed wetland sediment[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 138: 454-460
- [28] Pelissari C, Sezerino P H, Decezar S T, Wolff D B, Bento A P, Junior O C, Philippi L S Nitrogen transformation in horizontal and vertical flow constructed wetlands applied for

- dairy cattle wastewater treatment in southern Brazil [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 73: 307-310
- [29] 张彩莹, 王岩, 王妍艳. 潜流人工湿地对畜禽养殖废水的净化效果[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(17): 160-168  
Zhang C Y, Wang Y, Wang Y Y. Purification effect of subsurface flow constructed wetland on livestock wastewater [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(17): 160-168 (in Chinese)
- [30] Li X, Li Y, Li Y, Wu J. Diversity and distribution of bacteria in a multistage surface flow constructed wetland to treat swine wastewater in sediments [J]. *Applied microbiology and biotechnology*, 2018, 102(24): 10755-10765
- [31] Li X, Li Y, Li Y, Wu J. Enhanced nitrogen removal and quantitative analysis of removal mechanism in multistage surface flow constructed wetlands for the large-scale treatment of swine wastewater [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 575-582
- [32] Wu H, Fan J, Zhang J, Ngo H H, Guo W, Liang S, Hu Z, Liu H. Strategies and techniques to enhance constructed wetland performance for sustainable wastewater treatment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(19): 14637-14650
- [33] Zhi W, Ji G. Quantitative response relationships between nitrogen transformation rates and nitrogen functional genes in a tidal flow constructed wetland under C/N ratio constraints [J]. *Water Research*, 2014, 64: 32-41
- [34] 张燕, 刘雪兰, 王月明, 井庆川, 阎佩佩, 刘瑞亭, 石天虹, 魏祥法. 人工湿地系统不同流段中氮的去除效果研究[J]. *湿地科学*, 2017, 15(1): 32-39  
Zhang Y, Liu X L, Wang Y M, Jing Q C, Yan P P, Liu R T, Shi T H, Wei X F. Removal efficiency of nitrogen in different stages of constructed wetlands[J]. *Wetland Science*, 2017, 15(1): 32-39 (in Chinese)
- [35] Feng L, Wang R, Jia L, Wu H. Can biochar application improve nitrogen removal in constructed wetlands for treating anaerobically-digested swine wastewater? [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 379: 122273
- [36] 张亚琼, 崔丽娟, 李伟, 李凯. 潮汐流人工湿地的除氮效果及影响因素[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(7): 1172-1178  
Zhang Y Q, Cui L J, Li W, Li K. Depth variations and factors influencing nitrogen removal in tidal flow constructed wetlands [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(7): 1172-1178 (in Chinese)
- [37] Han Z, Miao Y, Dong J, Shen Z, Zhou Y, Liu S, Yang C. Enhanced nitrogen removal and microbial analysis in partially saturated constructed wetland for treating anaerobically digested swine wastewater [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(4): 52
- [38] Han Z, Dong J, Shen Z, Mou R, Zhou Y, Chen X, Fu X, Yang C. Nitrogen removal of anaerobically digested swine wastewater by pilot-scale tidal flow constructed wetland based on in-situ biological regeneration of zeolite [J]. *Chemosphere*, 2019, 217: 364-373
- [39] Du L, Trinh X, Chen Q, Wang C, Liu S, Liu P, Zhou Q, Xu D, Wu Z. Effect of clinoptilolite on ammonia emissions in integrated vertical-flow constructed wetlands (IVCWs) treating swine wastewater [J]. *Ecological Engineering*, 2018, 122: 153-158
- [40] Zhang S, Liu F, Luo P, Xiao R, Chen J, Chen L, Wu J. Does rice straw application reduce N<sub>2</sub>O emissions from surface flow constructed wetlands for swine wastewater treatment? [J]. *Chemosphere*, 2019, 226: 273-281
- [41] 陶梦妮, 陶正凯, 王印, 王玥, 谢婷玉, 荆肇乾. 人工湿地复合生物燃料电池强化脱氮研究[J]. *应用化工*, 2018, 47(10): 2212-2216  
Tao M N, Tao Z K, Wang Y, Wang Y, Xie T Y, Jing Z Q. Study on enhanced nitrogen removal in microbial fuel cell integrated with constructed wetlands [J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(10): 2212-2216 (in Chinese)
- [42] Liu F, Sun L, Wan J, Shen L, Yu Y, Hu L, Zhou Y. Performance of different macrophytes in the decontamination of and electricity generation from swine wastewater via an integrated constructed wetland-microbial fuel cell process [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 89: 252-263
- [43] Liu F, Zhang S, Wang Y, Li Y, Xiao R, Li H, He Y, Zhang M, Wang D, Li X, Wu J. Nitrogen removal and mass balance in newly-formed *Myriophyllum aquaticum* mesocosm during a single 28-day incubation with swine wastewater treatment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 166: 596-604
- [44] Zhang S, Liu F, Xiao R, He Y, Wu J. Nitrogen removal in *Myriophyllum aquaticum* wetland microcosms for swine wastewater treatment; 15 N-labelled nitrogen mass balance analysis [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(2): 505-511
- [45] 余关龙, 付永江, 彭海渊, 严晓江, 杜春艳. 水平潜流人工湿地对水中 Cd<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup> 及营养物的去除 [J]. *环境工程*, 2019, 37(10): 116-120  
Yu G L, Fu Y J, Peng H Y, Yan X J, Du C Y. Removal properties of Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> and nutrients in horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(10): 116-120 (in Chinese)
- [46] Hejna M, Moscatelli A, Stroppa N, Onelli E, Pilu S, Baldi A, Rossi L. Bioaccumulation of heavy metals from wastewater through a *Typha latifolia* and *Thelypteris palustris* phytoremediation system [J]. *Chemosphere*, 2020, 241: 125018
- [47] Almeida C M R, Santos F, Ferreira A C F, Gomes C R, M C P Basto, A P Muchaa. Constructed wetlands for the removal of metals from livestock wastewater: Can the presence of veterinary antibiotics affect removals? [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 137: 143-148
- [48] 管东红, 管映兵, 杨帆. 水生植物去除废水重金属研究进展 [J].



- 绿色科技, 2019(18): 80-82
- Guan D H, Guan Y B, Yang F. Research progress in application of clay mineral sand and their derivatives in heavy metal wastewater treatment [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2019(18): 80-82 (in Chinese)
- [49] Yadav A K, Abbassi R, Kumar N, Satya S, Sreekrishnan T R, Mishra B K. The removal of heavy metals in wetland microcosms: effects of bed depth, plant species, and metal mobility[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 211: 501-507
- [50] Hu Z, Chu Y, Ma Y. Design of a combined constructed wetland system and its application on swine wastewater treatment[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2020, 146(1): 04019093
- [51] 李宏娟. 芦苇幼苗对含铜畜禽养殖废水的抗性生理研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009
- Li H J. Study on resistance physiology of *Phragmites australis* seedlings to the livestock wastewater containing copper[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [52] 卢信, 罗佳, 高岩, 严少华, 张振华. 畜禽养殖废水中抗生素和重金属的污染效应及其修复研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2014, 30(3): 671-681
- Lu X, Luo J, Gao Y, Yan S H, Zhang Z H. A review in ecotoxic effect of antibiotics and heavy metals co-contamination in livestock and poultry breeding wastewater and its remediation[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 30(3): 671-681 (in Chinese)
- [53] Liu L, Liu Y, Wang Z, Liu C, Huang X, Zhu G. Behavior of tetracycline and sulfamethazine with corresponding resistance genes from swine wastewater in pilot-scale constructed wetlands[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 278: 304-310
- [54] Liu L, Li J, Fan H, Huang X, Wei L, Liu C. Fate of antibiotics from swine wastewater in constructed wetlands with different flow configurations[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, 140: 119-125
- [55] Liu L, Liu C, Zheng J, Huang X, Wang Z, Liu Y, Zhu G. Elimination of veterinary antibiotics and antibiotic resistance genes from swine wastewater in the vertical flow constructed wetlands[J]. *Chemosphere*, 2013, 91(8): 1088-1093
- [56] Du L, Zhao Y, Wang C, Zhang H, Chen Q, Zhang X, Zhang L, Wu J, Wu Z, Zhou Q. Removal performance of antibiotics and antibiotic resistance genes in swine wastewater by integrated vertical-flow constructed wetlands with zeolite substrate[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 721: 137765
- [57] Carvalho P N, Araújo J L, Mucha A P, Basto M C P, Almeida C M R. Potential of constructed wetlands microcosms for the removal of veterinary pharmaceuticals from livestock wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 134: 412-416
- [58] Xian Q, Hu L, Chen H, Chang Z, Zou H. Removal of nutrients and veterinary antibiotics from swine wastewater by a constructed macrophyte floating bed system[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(12): 2657-2661
- [59] Carvalho P N, Basto M C P, Almeida C M R. Potential of *Phragmites australis* for the removal of veterinary pharmaceuticals from aquatic media [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 116: 497-501
- [60] Liu L, Liu C, Zheng J, Huang X, Wang Z, Liu Y, Zhu G. Elimination of veterinary antibiotics and antibiotic resistance genes from swine wastewater in the vertical flow constructed wetlands[J]. *Chemosphere*, 2013, 91(8): 1088-1093
- [61] Huang X, Liu C, Li K, Su J, Zhu G, Liu L. Performance of vertical up-flow constructed wetlands on swine wastewater containing tetracyclines and tet genes [J]. *Water Research*, 2015, 70: 109-117
- [62] 张子扬, 刘舒巍, 张璐. 人工湿地去除畜禽养殖废水中磺胺类抗生素抗性基因研究[J]. *环境科学与管理*, 2016, 41(5): 89-92
- Zhang Z Y, Liu S W, Zhang L. Removal of sulfonamide resistance genes in livestock farms with constructed wetland [J]. *Environmental Science and Management*, 2016, 41(5): 89-92 (in Chinese)
- [63] Liu L, Li J, Fan H, Huang X, Wei L, Liu C. Fate of antibiotics from swine wastewater in constructed wetlands with different flow configurations[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, 140: 119-125
- [64] Vacca G, Wand H, Nikolauz M, Kusch P, Kästner M. Effect of plants and filter materials on bacteria removal in pilot-scale constructed wetlands[J]. *Water Research*, 2005, 39(7): 1361-1373

责任编辑: 杨爱东