



人工湿地抗生素与重金属的去除及其环境影响

秦玉, 李慧莉, 尹晓雪, 郑效旭, 刘煜, 吕萍, 王亚博, 侯得印, 徐圣君

Removal of antibiotics and heavy metals in constructed wetlands and their environmental impacts

QIN Yu, LI Huili, YIN Xiaoxue, ZHENG Xiaoxu, LIU Yu, LYU Ping, WANG Yabo, HOU Deyin, XU Shengjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021.06.022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

人工湿地抗生素与重金属的去除及其环境影响

秦 玉¹⁻³, 李慧莉², 尹晓雪³, 郑效旭³, 刘 煜², 吕 萍², 王亚博², 侯得印³, 徐圣君³

(1. 深圳市北林苑景观及建筑规划设计院有限公司, 广州 深圳 518038;

2. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050;

3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘 要: 随着水环境中污染物的日益增多, 风险物质的控制受到广泛关注, 抗生素与重金属作为重要的风险污染物, 其单独与交互作用都对水环境产生了严重影响。人工湿地以其经济、简单和易控制等优点成为目前普遍采用的污水深度处理技术, 但现阶段的研究主要集中于单一污染物的去除, 对共存污染的作用机制及处理效果研究较少。文章综述了人工湿地对抗生素与重金属的去除原理及两者共存时产生的环境影响, 主要是靠基质、植物与微生物之间的协同作用得以去除; 由抗生素的存在导致的耐药性在重金属的作用下加速了蔓延, 而抗生素同时又会促进植物对重金属的吸收, 以期两者共存污染的治理及风险控制给予一些参考。

关键词: 人工湿地; 抗生素; 重金属; 去除原理; 环境影响

中图分类号: X171.1

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021.06.022

Removal of antibiotics and heavy metals in constructed wetlands and their environmental impacts

QIN Yu¹⁻³, LI Huili², YIN Xiaoxue³, ZHENG Xiaoxu³, LIU Yu², LYU Ping², WANG Yabo², HOU Deyin³, XU Shengjun³

(1. Shenzhen Beilinyuan Landscape and Architecture Planning and Design Institute Co. Ltd., Shenzhen 518038, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: With the increasing number of pollutants in the water environment, the control of risk substances has been widely concerned. Antibiotics and heavy metals, as the important risk pollutants, have a serious impact on the water environment. Constructed wetland has become a widely used advanced wastewater treatment technology because of its advantages of economy, simplicity and easy control. However, the research at present mainly focuses on the removal of one single pollutant, and the research on the mechanism and treatment effect of coexisting pollutions is less. This paper summarized the removal principle of antibiotics and heavy metals in the constructed wetland and the environmental impact when they coexisted, which mainly depended on the synergistic effect among substrate, plants and microorganisms. The drug resistance caused by the existence of antibiotics accelerated the spread under the action of heavy metals, and antibiotics can promote the absorption of heavy metals by plants at the same time. This paper aims to provide a reference for the co-existence of antibiotics and heavy metals governance and risk control.

Keywords: constructed wetland; antibiotics; heavy metals; removal principle; environmental impact

CLC number: X171.1

环境中存在各式各样污染物, 其在具有各自行为活动的同时还会存在一些交互作用。抗生素与重金属作为重要的风险物质, 对水环境有着持久影响, 在河流、沉积物及土壤等中均可发现两者共存污染现象。抗生素是微生物产生的一类抑制其他

微生物生命活动的代谢产物, 目前已广泛应用于医药、农业和水产养殖业等, 用于预防和治疗疾病及促进动物或农作物生长。除抗生素外, 水中重金属具有毒性、不可生物降解性, 且会转化为更具活性或惰性的不同化合物, 也对人类健康构成威胁。同

收稿日期: 2021-01-16

基金项目: 深圳市技术创新计划技术攻关项目(JSGG20180718115204691); 国家自然科学基金资助项目(41907150); 甘肃省住建厅绿色建筑项目 JK2017-33); 宁夏回族自治区重大项目(2019BFG02032)

作者简介: 秦 玉(1996-), 女, 硕士研究生。研究方向: 环境工程。E-mail: 244557002@qq.com

通信作者: 徐圣君(1985-), 男, 博士、副研究员。研究方向: 环境工程。E-mail: sjxu@rcees.ac.cn

引用格式: 秦 玉, 李慧莉, 尹晓雪, 等. 人工湿地抗生素与重金属的去除及其环境影响[J]. 环境保护科学, 2021, 47(6): 121-126.

时, 抗生素中含有的羧基、羟基和氨基等基团可与重金属发生络合, 且络合物对复合污染体系的毒理效应存在重要影响, 此外, 抗生素还会诱导耐药菌 (ARB) 及抗性基因 (ARGs) 的产生。在两者共存污染下, 水体中存在各种物理化学反应, 增加了水体的环境风险。随着医疗、养殖和农业等逐渐发展, 其污染日趋恶化。两者通常随粪便或农田退水等方式排入水体, 造成抗生素与重金属的污染, 尤其是畜禽养殖场长期交叉使用多种抗生素及重金属, 可诱发水体中多重耐药菌及具有这两者共同抗性的细菌甚至是一些致病菌的产生^[1-2]。同时, 耐药基因可通过水体进行传播、演化和繁殖, 并且通过同属或者不同属的细菌利用基因的转移传递, 进而导致耐药基因在各种介质中迁移转化, 甚至可通过饮用水等方式传递至人体与动物体内, 严重危害人类与动物的健康。

人工湿地以其经济、简单和易控制等优点成为目前普遍采用的污水深度处理技术, 但应用于抗生素与重金属共存污染水体的处理还较少, 本文综述了人工湿地去除抗生素与重金属的基本原理, 并介绍了两者共存污染对环境产生的影响, 以期对两者共存污染的治理及风险控制给予一些参考。

1 人工湿地中抗生素的去除

人工湿地去除抗生素的作用较强 (>50%)^[3-4], 然而去除效率易受多种因素影响, 如基质类型、植物类型、进水浓度和水温等, 其中植物产生的影响较大, 因为其在过滤微粒和向细菌输送氧气方面发挥着重要作用, 同时也为生物膜的形成提供了结构基础, 进而增强了微生物的去除能力^[5]。此外, 外部环境因素的变化易导致抗生素在一段时间后从基质或底泥中释放出来^[6]。

人工湿地抗生素的产生及去除方式, 见图 1。

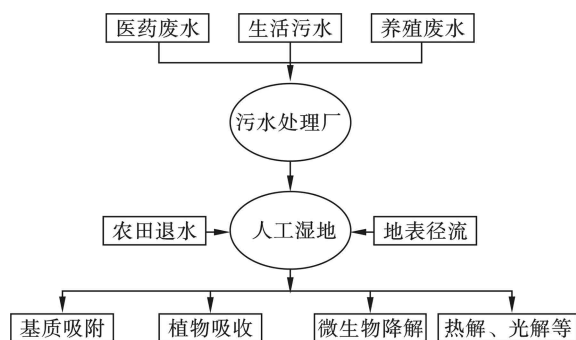


图 1 人工湿地抗生素的产生及去除

1.1 基质吸附

基质 (如沸石、土壤等) 是组成人工湿地的基础部分, 对抗生素的去除主要通过吸附和截留实现。基质不同产生的吸附效果不同, 其中, 沸石的吸附效果较好, 原因可能是其同时具有微孔结构和桥连羟基 (Si—OH), 前者可为化学吸附和微生物附着提供高比表面积, 后者可对各种化学反应起到催化作用^[7-8]。此外, 抗生素还可与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 或 Al^{3+} 等金属离子复合后吸附在土壤上, 这种吸附受多种因素 (如范德华力、阳离子交换和表面络合) 的影响, 因此, 对含有较多离子官能团的抗生素具有较高的吸附能力^[9-10]。

1.2 植物吸收

抗生素在植物体内的吸收与其水分配系数 ($\log K_{ow}$) 密切相关, 抗生素的 $\log K_{ow}$ 值越低, 说明水溶性越高, 被植物吸收的可能性越大。此外, 高度极性 ($\log K_{ow} < 1$) 或高度亲脂性 ($\log K_{ow} > 4$) 的抗生素不易被植物吸收。植物主要是通过被动吸收作用来富集抗生素的, 一般来说, 根对抗生素的吸收能力高于其他组织。根部由于充氧海绵组织的存在, 常常表现出径向氧损失 (ROL), 并保持根区处于相对氧化状态, 这可能限制了厌氧菌对抗生素的降解, 但根系的氧气分泌和分泌物可改善植物根系环境, 从而有助于促进微生物通过自身代谢来降解抗生素的效率^[11]。此外, TAI et al^[12] 发现根际的铁氧化细菌和根系分泌的过氧化氢酶可以促进铁离子形成铁的氧化物/氢氧化物 (铁膜), 从而使大环内酯类抗生素 (MLs) 在铁膜上与土壤有机质或无机胶体发生反应而去除, 因而具有高 ROL 的优势植物可以促进形成铁膜, 提高对抗生素的去除率。

1.3 微生物降解

微生物群落结构的稳定可提高抗生素的去除, 共代谢是其主要方法, 指抗生素被非特异性分解酶降解, 并转化生成相应产物^[13]。然而, 这过程在如温度、接触时间和进水浓度等因素的影响下有着不同变化。暖季且进水浓度较高时, 人工湿地中含有较多的营养盐和有机物, 导致植物和微生物生长过快, 从而降低了系统孔隙率, 因此要达到较高去除效果则需要较长时间。寒冷季节且低进水浓度时, 需要更多的有机物来提供碳源或能源, 以增加微生物的活性和数量, 从而促进抗生素的去除^[14]。除此之外, 土壤湿度和温度也是重要影响因素, 土壤中

水分的动态变化加速了抗生素在微生物群落间的迁移,而土壤温度升高可能会导致相关的细菌或真菌死亡,造成抗生素去除能力减弱^[15]。

微生物燃料电池(MFCs)技术是一种新型的抗生素去除技术,具有较好的效果,湿地中微生物活

性在电流刺激下得到提高,从而加速降解抗生素^[16]。在 CW-MFCs 系统中,开路或闭路操作和水力停留时间是影响发电和抗生素处理效率的重要条件^[17]。

人工湿地去除抗生素的应用案例,见表 1。

表 1 人工湿地去除抗生素的应用案例

人工湿地类型	抗生素	去除效率/%	参考文献
垂直上升流	磺胺甲恶唑 (SMX)、四环素 (TC)	>98	[18]
向下垂直潜流+ 向上垂直潜流	替米考星 (TMS)、强力霉素 (DOC)	>98	[19]
垂直潜流	喹诺酮类 (FQs)、四环素类 (TCs)、大环内酯类 (MLs)	夏季: 35 ~ 91 冬季: -75 ~ 83	[20]
向上垂直流 水平潜流 表面流	喹诺酮类 (FQs)、四环素类 (TCs)、大环内酯类 (MLs)	夏季: 37 ~ 98 冬季: -30 ~ 98	[20]
地下垂直流	恩诺沙星 (ENR)、头孢噻夫 (CEF)	>90	[21]
调节池+4个地表流+ 1个潜流	氧氟沙星 (OFX)、林可霉素 (LIN)、磺胺二甲嘧啶 (SMZ)	78 ~ 100	[22]

2 人工湿地中重金属的去除

含重金属废水的处置措施有沉淀、电解和膜分离等。这些措施虽然可以去除重金属,但也存在一些缺点。例如沉淀法会产生较多底泥,需要进行再次清除;电解法能耗高、维护复杂、副反应多;膜分离法成本较高,操作过程复杂等^[23]。而人工湿地具有经济、高效且易操作等优点,可有效去除重金属,其主要是通过基质吸附、植物吸收和不溶盐形式沉淀来去除。

2.1 基质吸附

基质可通过吸附作用截留部分重金属,目前应用较广泛的有生物陶瓷、熔岩、火山岩和炉渣等,它们独特的结构可为植物根系带来较充足的附着面积,同时也有助于周围微生物的生长,从而加速重金属的吸附沉淀和降解^[24]。ZHAO et al^[23]将制作的钛酸钠纳米材料用作填料,通过与层间阳离子的离子交换来吸附具有不可逆吸附容量的重金属,解决了传统填料吸附能力低、脱附造成的二次污染等问题。此外,采用基质吸附与生物吸附相结合的方法可进一步提高重金属的去除效率。GUO et al^[25]通过将沸石与生物吸附剂混合使用和单独使用沸石做比较,发现沸石与生物吸附剂组合对砷的去除效果较单独使用沸石更好。

2.2 植物吸收

植物可以通过组织中的吸收和积累作用以及

根表面的吸附作用来去除水中的重金属,还可在底物的催化作用下吸收重金属,并通过降低水的流速来增加重金属的自然沉降,见图 2。

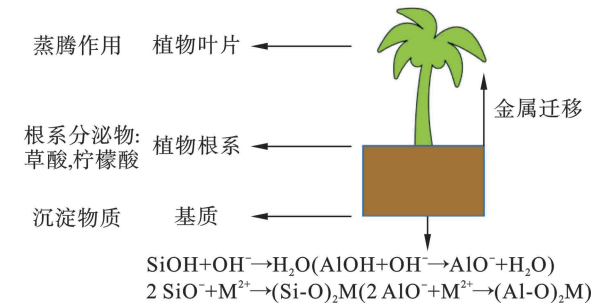


图 2 植物对重金属的去除作用

研究表明,单子叶植物相比其他植物对重金属的去除效果更好,可能是因为其根系是纤维状的,为微生物的生长带来了较大的表面积,并可产生更多的植物铁载体,如麦根酸、乙酸盐和草酸盐等,这类物质中存在胺和羧基,能有效地螯合重金属^[26]。这些在根部吸收的重金属只会有很小一部分迁移到植物上部,这可能是因根系液泡的固存作用,因此通过刈割植物上部来去除重金属的效果不明显^[27-28]。但植物上部,例如植物叶片,也会吸收部分重金属,即生物量大、蒸腾量高的植物,可以促进对重金属去除^[29]。除植物自身生长特性外,SI et al^[30]发现外部电场促进了植物根系中铜、铅和锌的吸收,且不会促进重金属从根到芽的转移,但高电场强度可导致植物根茎中重金属吸收减少,因此可通过附加强度合适的外部电场来提高植物的吸收

效率。

2.3 不溶盐沉淀

人工湿地去除重金属还可通过形成不溶盐沉淀。主要是通过厌氧条件下硫酸盐还原菌代谢低分子量有机质生成 H_2S , H_2S 与铜、镍、钴、锌、镉、锂和铷等重金属结合生成不溶性沉淀物而去除^[31]。这种沉淀反应在暖季发生较多,水中较高的温度会使溶解氧浓度以及氧化还原电位降低,硫酸盐加速还原为硫化物,从而促成重金属的沉积,此外,植物生长过程中根区分泌的有机质也会促进此过程。但强降雨会增加水中溶解氧浓度,限制硫酸盐还原,导致重金属沉淀效率下降。而在冬季,硫化物氧化主导硫循环, H_2S 含量减少,见图 3。除通过形成硫化物沉淀以外,部分重金属如 Cu^{2+} 和 Cr^{6+} 也可以通过与铁、锰和氢氧化铝共沉淀来去除^[32-33]。JIA et al^[34] 通过在人工湿地中制造 Fe-C 微电解反应,在反应体系中自发生成羟基、原子氢和 Fe^{2+} ,以促进重金属的沉淀。

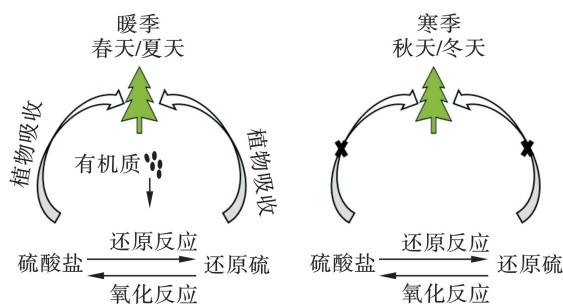


图 3 不同季节硫循环示意图

3 抗生素与重金属的环境影响

抗生素与重金属同时存在时,除了各自对环境产生影响外,还会存在一系列交互作用,造成更复杂的环境影响。

一方面,在抗生素污染的水体中微生物会逐渐演变成为耐药菌,这种耐药性对环境产生着潜在危害,已成为全球极需关注的问题,除抗生素影响外,湿地中各种重金属还会加速耐药性的蔓延,水体中 ARGs 的丰度与重金属浓度成正比。ZHANG et al^[35] 通过研究发现 Cu^{2+} 、 Ag^{+} 、 Cr^{6+} 和 Zn^{2+} 即使在亚抑制浓度下,也促进了大肠杆菌之间 ARGs 的转移,这与细胞内活性氧(ROS)的形成、应急反应(SOS 反应)、细胞膜通透性的增加和相关基因的表达改变有关。即使重金属被去除后,这种耐药性还会维持一段时间,在基质中可能会达到几十天。此外,重

金属除了会促进耐药性的传播外,还会导致 ARB 的突变,其突变率随时间逐渐增加,同时这些抗性突变体也表现出多重抗性,并能够稳定地将抗性遗传给后代;另一方面,对抗生素存在抗性的微生物,有时也会对重金属存在抗性。微生物获得这种性质有 2 种机制:共抗和交叉抗性,其中交叉抗性是最可能的机制^[36-37]。此外,许多抗生素如喹诺酮类和四环素类,含有羧基、羰基或哌嗪基,这些类配体抗生素可通过络合作用结合多种重金属,通常这些络合物比游离抗生素更为活跃,毒性更高,且这种毒性也不仅是单一抗生素与重金属毒性的加和作用,加重了湿地的生态风险性。然而,ALMEIDA et al^[38] 发现头孢噻夫在与重金属形成络合物的同时,还可以提高湿地中植物分泌的有机配体与重金属的络合反应,从而增强铜、铁、锰和锌的积累,在金属络合物存在下,植物吸收能力增强。

因此,在利用人工湿地在去除抗生素与重金属共存污染时,要充分考虑两者之间的相互作用对去除效率的影响。

4 结论与展望

人工湿地能够通过基质,植物与微生物之间的协同作用较好地去除抗生素与重金属,具有良好的应用前景。在两者同时存在时,即使在低浓度下,也会发生一系列交互作用,比如,重金属会加速 ARGs 的传播,还会使 ARB 发生突变导致其产生多种抗性。一些抗生素可与重金属形成络合物从而具有更高的毒性,但有时抗生素存在下湿地植物对重金属的吸收能力增强。

随着污水处理要求的提升,对抗生素与重金属共存污染的交互作用、去除机理及其产生的环境影响方面的研究还不够深入,应加强研究如下几点。

(1) 抗生素与重金属络合物的分子结构与两者络合位点及在抗生素与重金属络合物的存在下,湿地植物对重金属的吸收能力增强是否针对所有情况和具体吸收增强的机理;

(2) 抗生素与重金属共存污染及两者形成的络合物的生态毒性作用需进一步评判,同时考虑在湿地中复杂污染物的干扰下其毒性效应如何变化;

(3) 抗生素与重金属在基质中的竞争吸附机理有待进一步深入研究,以便于人工湿地更好地应用于水体抗生素与重金属的共存污染治理;

(4)除使用湿地的自净化外,还可在湿地中附加措施如燃料电池、投加微生物等强化两者的去除,减少共存污染的风险。

参考文献

- [1] LAMORI J G, XUE J, RACHMADI A T, et al. Removal of fecal indicator bacteria and antibiotic resistant genes in constructed wetlands[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(10): 10188 – 10197.
- [2] GARCIA J, GARCIA-GALAN M J, DAY J W, et al. A review of emerging organic contaminants (EOCs), antibiotic resistant bacteria (ARB), and antibiotic resistance genes (ARGs) in the environment: Increasing removal with wetlands and reducing environmental impacts[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 307: 123228.
- [3] LIU X, GUO X, LIU Y, et al. A review on removing antibiotics and antibiotic resistance genes from wastewater by constructed wetlands: Performance and microbial response[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 254(Pt A): 112996.
- [4] JIANG Z B, DU P, LIAO Y B, et al. Oyster farming control on phytoplankton bloom promoted by thermal discharge from a power plant in a eutrophic, semi-enclosed bay[J]. *Water Research*, 2019, 159: 1 – 9.
- [5] FANG H, ZHANG Q, NIE X, et al. Occurrence and elimination of antibiotic resistance genes in a long-term operation integrated surface flow constructed wetland[J]. *Chemosphere*, 2017, 173: 99 – 106.
- [6] LI Y, ZHU G, NG W J, et al. A review on removing pharmaceutical contaminants from wastewater by constructed wetlands: design, performance and mechanism[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469: 908 – 932.
- [7] CHEN J, WEI X D, LIU Y S, et al. Removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from domestic sewage by constructed wetlands: Optimization of wetland substrates and hydraulic loading[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 240 – 248.
- [8] DU L, ZHAO Y, WANG C, et al. 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.
- [9] ZHANG D, GERSBERG R M, NG W J, et al. Removal of pharmaceuticals and personal care products in aquatic plant-based systems: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 184: 620 – 639.
- [10] LIU L, LIU C, ZHENG J, et al. Elimination of veterinary antibiotics and antibiotic resistance genes from swine wastewater in the vertical flow constructed wetlands[J]. *Chemosphere*, 2013, 91(8): 1088 – 1093.
- [11] MANOJ K, K M M, DIRK V E J, et al. Plants impact structure and function of bacterial communities in Arctic soils[J]. *Plant and Soil*, 2016, 399(1/2): 319 – 332.
- [12] TAI Y, TAM N F Y, WANG R, et al. Iron plaque formation on wetland-plant roots accelerates removal of water-borne antibiotics[J]. *Plant and Soil*, 2018, 433(1-2): 323 – 338.
- [13] SANTOS F, ALMEIDA C M R, RIBEIRO I, et al. Removal of veterinary antibiotics in constructed wetland microcosms - Response of bacterial communities[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 169: 894 – 901.
- [14] DAN A, ZHANG X, DAI Y, et al. Occurrence and removal of quinolone, tetracycline, and macrolide antibiotics from urban wastewater in constructed wetlands[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 252: 119677.
- [15] RÜDIGER R, VIVIANE R, INGRID R, et al. Soil microbial community responses to antibiotic-contaminated manure under different soil moisture regimes[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, 98(14): 6487 – 6495.
- [16] WEN H, ZHU H, YAN B, et al. Treatment of typical antibiotics in constructed wetlands integrated with microbial fuel cells: Roles of plant and circuit operation mode[J]. *Chemosphere*, 2020, 250: 126252.
- [17] LI H, CAI Y, GU Z, et al. Accumulation of sulfonamide resistance genes and bacterial community function prediction in microbial fuel cell-constructed wetland treating pharmaceutical wastewater[J]. *Chemosphere*, 2020, 248: 126014.
- [18] SONG H L, ZHANG S, GUO J, et al. Vertical up-flow constructed wetlands exhibited efficient antibiotic removal but induced antibiotic resistance genes in effluent[J]. *Chemosphere*, 2018, 203: 434 – 441.
- [19] HUANG X, LUO Y, LIU Z, et al. Influence of two-stage combinations of constructed wetlands on the removal of antibiotics, antibiotic resistance genes and nutrients from goose wastewater[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(20): 4030.
- [20] ZHANG X, WANG T, XU Z, et al. Effect of heavy metals in mixed domestic-industrial wastewater on performance of recirculating standing hybrid constructed wetlands (RSHCWs) and their removal[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 379: 122363.
- [21] SANTOS F, ALMEIDA C M R, RIBEIRO I, et al. Potential of constructed wetland for the removal of antibiotics and antibiotic resistant bacteria from livestock wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 129: 45 – 53.
- [22] CHEN J, LIU Y S, SU H C, et al. Removal of antibiotics and antibiotic resistance genes in rural wastewater by an integrated constructed wetland[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(3): 1794 – 1803.
- [23] ZHAO M, WANG S, WANG H, et al. Application of sodium titanate nanofibers as constructed wetland fillers for efficient removal of heavy metal ions from wastewater[J]. *Environmental*

- [Pollution](#), 2019, 248: 938 – 946.
- [24] LIANG Y, ZHU H, BANUELOS G, et al. Preliminary study on the dynamics of heavy metals in saline wastewater treated in constructed wetland mesocosms or microcosms filled with porous slag[J]. [Environmental Science and Pollution Research](#), 2019, 26(33): 33804 – 33815.
- [25] GUO X, CUI X, LI H. Effects of fillers combined with biosorbents on nutrient and heavy metal removal from biogas slurry in constructed wetlands[J]. [Science of the Total Environment](#), 2020, 703: 134788.
- [26] KUMAR P, KAUR R, CELESTIN D, et al. Chromium removal efficiency of plant, microbe and media in experimental VSSF constructed wetlands under monocropped and co-cropped conditions[J]. [Environment Science and Pollution Research](#), 2020, 27(2): 2071 – 2086.
- [27] BATOOL A, SALEH T A. Removal of toxic metals from wastewater in constructed wetlands as a green technology; catalyst role of substrates and chelators[J]. [Ecotoxicology Environment Safety](#), 2020, 189: 109924.
- [28] SIMA J, SVOBODA L, SEDA M, et al. The fate of selected heavy metals and arsenic in a constructed wetland[J]. [Journal of Environmental Science and Health, Part A](#), 2019, 54(1): 56 – 64.
- [29] SCHUCK M, GREGER M. Plant traits related to the heavy metal removal capacities of wetland plants[J]. [International Journal of Phytoremediation](#), 2020, 22(4): 427 – 435.
- [30] 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: 114937.
- [31] XU X, MILLS G L. Do constructed wetlands remove metals or increase metal bioavailability?[J]. [Journal of Environmental Management](#), 2018, 218: 245 – 255.
- [32] SIMA J, SVOBODA L, POMIJOVA Z. Removal of selected metals from wastewater using a constructed wetland[J]. [Chemistry & Biodiversity](#), 2016, 13(5): 582 – 590.
- [33] ZHAO Z, XU C, ZHANG X, et al. Addition of iron materials for improving the removal efficiencies of multiple contaminants from wastewater with a low C/N ratio in constructed wetlands at low temperatures[J]. [Environmental Science Pollution Research](#), 2019, 26(12): 11988 – 11997.
- [34] JIA L, LIU H, KONG Q, et al. Interactions of high-rate nitrate reduction and heavy metal mitigation in iron-carbon-based constructed wetlands for purifying contaminated groundwater[J]. [Water Research](#), 2020, 169: 115285.
- [35] ZHANG Y, GU A Z, CEN T, et al. Sub-inhibitory concentrations of heavy metals facilitate the horizontal transfer of plasmid-mediated antibiotic resistance genes in water environment[J]. [Environmental Pollution](#), 2018, 237: 74 – 82.
- [36] SEILER C, BERENDONK T U. Heavy metal driven co-selection of antibiotic resistance in soil and water bodies impacted by agriculture and aquaculture[J]. [Frontiers in Microbiology](#), 2012, 3: 399.
- [37] DICKINSON A W, POWER A, HANSEN M G, et al. Heavy metal pollution and co-selection for antibiotic resistance: A microbial palaeontology approach[J]. [Environment International](#), 2019, 132: 105117.
- [38] ALMEIDA C M, SANTOS F, FERREIRA A C, et al. 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.