

· 专论与综述 ·

水产养殖中抗生素污染治理研究进展

袁孝康¹, 付绿倩², 陈华林³, 周江敏³, 刘欣聪¹, 邓仕槐^{1*}

(1. 四川农业大学环境学院, 四川 成都 611130; 2. 宜宾学院农林与食品工程学部, 四川 宜宾 644000; 3. 温州大学生命与环境科学学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 综述了我国水产养殖中常用的抗生素种类, 分析了抗生素过量使用造成的危害及引发的环境安全问题, 从非生物法和生物法两个角度, 介绍了抗生素污染主要治理技术的研究进展, 并提出了相应的源头控制策略。针对当前水产养殖中抗生素污染治理的难点, 提出了探究抗生素的环境迁移转化途径、新型绿色降解技术和源头防治工艺等研究方向。

关键词: 抗生素; 污染治理技术; 源头防控; 水产养殖

中图分类号: X592 文献标志码: A 文章编号: 1006-2009(2023)04-0001-06

Research Progress of Antibiotic Pollution Control in Aquaculture

YUAN Xiao-kang¹, FU Lv-qian², CHEN Hua-lin³, ZHOU Jiang-min³, LIU Xin-cong¹, DENG Shi-huai^{1*}

(1. College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China; 2. Agriculture, Forestry and Food Engineering Department of Yibin University, Yibin, Sichuan 644000, China; 3. College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China)

Abstract: This article reviewed the types of antibiotics commonly used in aquaculture in China, analyzed the harm and environmental safety issues caused by overuse of antibiotics, introduced the research progress of the main antibiotic pollution control technologies from the perspectives of abiotic and biological methods, and put forward the corresponding source control strategies. In response to the current difficulties in controlling antibiotic pollution in aquaculture, it proposed to explore the pathway of environmental migration and transformation of antibiotics, new green degradation technology and source control process.

Key words: Antibiotics; Pollution control technology; Source prevention and control; Aquaculture

中国作为水产养殖大国, 水产养殖总面积高达 719 万 hm^2 , 产量占据全球总产量的 61.2%^[1]。随着高密度养殖技术的应用, 养殖塘水质极易恶化, 鱼虾频繁发病甚至死亡。抗生素具有强大的抗菌作用, 可以有效治理和预防鱼虾疾病^[2], 因而成为水产养殖的必备药物。

抗生素是一种天然存在或者通过半人工合成及人工合成的化合物^[3], 作为 20 世纪最重要的医学发现之一, 其在水产养殖领域发挥了重要作用^[4]。然而, 抗生素滥用也给人类和生态系统带来了巨大的安全隐患。在水产养殖中, 抗生素往往过量使用^[5], 抗生素投加后, 超过 75% 的原药和代谢物进入水体, 并在底泥中蓄积。据统计, 2013 年我国抗生素年使用量高达 16 万 t, 同年约有超过

5 万 t 抗生素被排入环境中^[6]。抗生素在水体尤其是底泥中高度富集, 长时间存在并可能造成二次污染。一方面, 抗生素再次进入水体中循环, 被水生生物吸收, 进而影响人类健康; 另一方面, 抗生素能直接杀死水产养殖中降解底泥的有益微生物或抑制其生长, 破坏微生物群落结构和功能。

由于流动性和丰富的微生物多样性, 水生环境

收稿日期: 2022-07-18; 修订日期: 2023-05-26

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2020YFD1100704); 亚州开发银行贷款农业综合开发长江绿色生态廊道基金资助项目; 四川省重大科技专项基金资助项目(2019YFS0502)

作者简介: 袁孝康(1997—), 男, 河南安阳人, 博士研究生, 主要研究方向为废弃物处理与资源化利用。

* 通信作者: 邓仕槐 E-mail: shdeng8888@163.com

是抗生素污染的主要传播途径^[7], 水产养殖抗生素污染已成为世界范围内的环境热点问题。今综述水产养殖中常用的抗生素种类、抗生素过量使用带来的问题及其污染治理技术, 提出相应的源头防控建议, 以期在水产养殖中抗生素污染治理研究提供理论依据。

1 水产养殖中常用的抗生素

目前, 水产养殖的发展趋向于集约化、规模化养殖手段^[8], 在提高产量的同时, 也给水产动物的免疫系统带来巨大挑战。细菌性疾病是水产动物病害的主要根源, 占生物源性疾病的 57.6%, 而使用抗生素则是防治水产动物细菌性疾病的重要手段^[9]。抗生素的种类繁多, 我国现行国家标准中水产用兽药共计 145 个品种, 其中抗生素类药物有 5 类 23 种 43 个剂型(见表 1)^[10]。

表 1 我国水产养殖中允许使用的抗生素种类

Table 1 Types of antibiotics allowed for aquaculture species in China

大类	抗生素小类	作用	参考文献
氨基糖苷类	硫酸新霉素粉(共 1 种)	治疗外部或内部细菌感染, 可治疗气单胞菌、爱德华氏菌和弧菌等引起的肠道疾病	[11-12]
四环素类	土霉素、盐酸多西环素粉(共 2 种)	抗菌活性和组织穿透能力强, 防治鱼的白嘴病、白皮病和烂尾病等非常有效	[13-15]
酰胺醇类	甲砒霉素粉、氟苯尼考粉、氟苯尼考注射液、氟苯尼考预混剂(共 4 种)	对革兰氏阳性菌和阴性菌有较强的抑制作用, 毒性低, 可治疗细菌性烂鳃病、白头白嘴病	[16-17]
磺胺类 (抗菌药)	复方磺胺二甲嘧啶粉、复方磺胺甲噁唑粉、复方磺胺嘧啶粉、磺胺间甲氧嘧啶钠粉、复方磺胺嘧啶混悬液(共 5 种)	抗菌谱广、疗效强、易吸收, 可用于多种感染性疾病治疗	[18-20]
喹诺酮类 (抗菌药)	诺氟沙星粉、氟甲喹粉、诺氟沙星盐酸小檗碱预混剂、恩诺沙星粉、乳酸诺氟沙星可溶性粉、烟酸诺氟沙星预混剂、噁唑酸、噁唑酸散混悬液及溶液、盐酸环丙沙星盐酸小檗碱预混剂、维生素 C 磷酸酯镁盐酸环丙沙星预混剂(共 11 种)	抑制细菌广泛、高效, 降解快, 安全性较高, 对革兰氏阴性菌和阳性菌具有广谱性抑菌效果	[21-23]

2 抗生素过量使用带来的问题

2.1 对植物的影响

抗生素进入水体后, 对植物的生长发育有显著影响, 主要体现在根长、株高等方面^[24]。已有研究报告, 低浓度抗生素对植物生长具有促进作用, 而高浓度抗生素则会显著抑制植物生长^[25]。Cheng 等^[26]研究发现, 抗生素会诱导活性氧大量产生, 致使膜脂过氧化, 破坏细胞膜, 导致藻类细胞代谢紊乱甚至死亡。范硕等^[27]以油菜为材料, 采用保湿培养法研究了磺胺甲恶唑、四环素、诺氟沙星 3 种抗生素在不同浓度下对油菜种子发芽率、发芽势及培根生长的影响, 发现抗生素低浓度条件下可促进种子发芽, 高浓度条件下会产生抑制作用。魏瑞成等^[28]研究了金霉素浓度对油菜生长发育的影响, 发现沉积在底部的抗生素会破坏油菜对养分的吸收, 株高和根长受到明显抑制。Hanson 等^[29]研究了土霉素浓度对植物生长发育的影响, 发现高浓度土霉素会严重抑制植物的生长和发育, 原因是高浓度土霉素致使水体颜色加深, 导致光合作用受阻。

2.2 对动物的影响

水体中残留的抗生素会在水生动物体内蓄积,

引发毒性效应, 影响动物的正常发育, 对机体造成伤害^[30]。Wollenberger 等^[31]研究了四环素对鱼类的影响, 发现四环素对鱼体内的脱氧核糖核酸(DNA)造成了显著损害, 明显抑制了生物体内的酶活性。Qiu 等^[32]研究了恩诺沙星对斑马鱼胚胎生长发育的影响, 发现恩诺沙星浓度对斑马鱼早期发育有显著影响, 抗生素浓度越高, 斑马鱼畸形率越高。作为生态系统的消费者, 抗生素在食物链中传递给人类, 土霉素等可能引起人体免疫反应甚至致癌, 庆大霉素会导致突变造成肾病^[33]。舞德春等^[34]研究发现, 四环素对儿童尤其是婴儿造成的伤害最大, 会严重影响儿童骨骼、牙齿的发育, 导致某些部位生长畸形, 免疫力下降。

2.3 对微生物群落结构和功能的影响

水体中有很多有益微生物, 如光合细菌、硝化细菌等对维持水环境稳定起到关键作用, 乳酸杆菌、酵母菌等可以帮助水生动物新陈代谢, 抑制肠道致病菌。在使用抗生素防治水产动物细菌性疾病的同时, 可能会杀死有益微生物, 对微生物群落结构和功能造成极大冲击。Valderas 等^[35]研究发现, 磺胺类抗生素会抑制芽孢杆菌核酸的合成, 并

且抑制细胞壁对核酸合成中必要成分谷氨酸的渗透性,导致蛋白质无法合成。Kong 等^[36]研究发现,土霉素浓度与微生物对碳源的利用率呈负相关,土霉素浓度越高,微生物对碳源的利用能力越低,生物群落多样性随之减少。

2.4 诱导产生耐药菌株

抗生素耐药性被认为是对公共卫生的最大威胁,世界卫生组织称人类正处于后抗生素时代的边缘^[37],多重耐药菌株的到来将降低抗生素用于治疗细菌感染的有效性。目前,在水产养殖池塘中已发现多种具有抗生素耐药性的菌株,抗生素用量、养殖模式影响着抗性基因含量,在相同的养殖模式下,养殖时间越长意味着抗生素基因含量越高^[38]。

3 抗生素污染治理技术

目前,国内外学者已在水体抗生素污染治理方面取得了研究进展。抗生素污染治理技术主要包括非生物法和生物法,其中,非生物法包括物理法(吸附)和化学法(水解、光降解、氧化降解);生物法主要采用微生物降解和植物降解。

3.1 非生物法

3.1.1 吸附

吸附是比较常见的治理水体抗生素污染的方法^[39],常用的吸附剂有硅酸盐天然黏土矿物、生物炭、活性炭、离子交换树脂等^[40]。Tian 等^[41]研究了改性生物炭对抗生素磺胺甲异恶唑的吸附效果和吸附机理,发现吸附效果主要受比表面积、总孔体积和含氧基团的影响。陈经纶等^[42]研究了不同粒径微塑料对左氧氟沙星的吸附行为,发现粒径越小,微塑料对左氧氟沙星的富集能力越强,吸附过程以物理吸附为主。

3.1.2 水解

水解是抗生素在静态水体中降解的主要途径之一,作用机制是抗生素中的有机官能团与水中的 OH⁻ 交换,主要受温度、pH 值、阳离子螯合物、离子强度等 4 个环境因素的影响,磺胺类、大环内酯类抗生素容易发生水解^[43]。Loftin 等^[44]研究发现,四环素类抗生素的水解速率与环境温度、pH 值密切相关,降解过程受抗生素自身特性的影响。张杏艳等^[45]研究发现,四环素类抗生素的降解速率随 pH 值和温度升高而加快,离子强度对抗生素的降解速率无显著影响。

3.1.3 光降解

光降解是指污染物由于光作用而分解的现象,表层水体中的抗生素直接吸收光电子产生的降解为直接光降解,因光敏物质诱导而产生的降解为间接光降解,主要受光照强度、pH 值、腐殖酸等环境因素的影响^[46]。Reyes 等^[47]研究了光源对四环素光降解速率的影响,发现紫外灯、浴室照明灯、长波紫外光下四环素的半衰期分别为 10 min、20 min、120 min。赵芙蓉等^[48]研究了 pH 值和溶解性有机质对磺胺甲恶唑自然光降解的影响,发现反应速率在中等酸性条件下明显高于中性或碱性条件,不同浓度的泥炭腐殖酸对磺胺甲恶唑光降解均能产生抑制作用。

3.1.4 氧化降解

氧化降解是指污染物在电、强氧化剂的作用下发生降解,易受 pH 值、温度等环境因素的影响。Liu 等^[49]研究发现,紫外光活化过硫酸盐对四环素的降解机制主要为羟基化、脱甲基、脱羰和脱水,pH 值对活性自由基的产生和自由基活性均有明显影响。

3.2 生物法

3.2.1 微生物降解

抗生素在水中的生物降解主要通过微生物代谢,微生物使抗生素结构发生改变,引起理化性质的改变,将大分子化合物降解为小分子化合物,最后转化成 H₂O 和 CO₂,降解过程易受氧含量、温度、pH 值等环境因子的影响。闫雷等^[50]研究发现,产碱杆菌属细菌倾向于对磺胺甲恶唑进行修饰转化,希瓦氏菌属、无色杆菌属细菌倾向于将磺胺甲恶唑降解为小分子化合物,在好氧条件下降解效率会提高。刘元望等^[51]研究发现,微生物降解抗生素的机制主要包括取代基的氧化作用、水解作用、基团转移作用、去羟基化和裂合作用等。

3.2.2 植物降解

植物降解是指植物受到污染物刺激,通过根系释放分泌物和特定酶来降解污染物,避免自身受到伤害。植物降解具有安全绿色、易于维护、成本低廉等特点,主要受植物自身性质、季节等因素影响。陈姗等^[52]研究发现,植物降解抗生素的机制主要包括植物萃取/促进、植物平衡、植物固定、植物转化/降解、植物挥发和根系降解,可能是通过根部吸收或者分泌特定酶从而达到降解抗生素的目的,抗生素或在植物体内分解,或被固定在植物体内。

3.3 非生物法和生物法的应用比较

非生物法和生物法降解抗生素的过程比较复杂,受温度、pH 值、阳离子螯合物、离子强度、光照强度、氧含量等多种环境因素影响,其应用比较见表 2。非生物法虽然效率高,降解彻底,但耗能大,

运行成本高,易造成二次污染。生物法虽然具有生态性和再生性的优点,处理简单,成本较低,专一性强,绿色无二次污染,但去除效率有限,应用范围小。

表 2 非生物法和生物法的应用比较

Table 2 Application comparison of abiotic and biological methods

处理方法	优点	缺点	应用条件	处理效果	参考文献	
非生物法	吸附	快捷高效,成本低廉	无法破坏污染物,难再生利用	可沉降抗生素的回收,难生化降解抗生素废水的预处理	改性生物炭对抗生素磺胺甲异恶唑的去除率达 97%	[39]
	水解	自发进行	反应缓慢,水解程度有限	适用于磺胺类、大环内酯类等极易水解的抗生素	水解、光解和生物降解在去除四环素中的占比分别为 50%、20% 和 30%	[45,53]
	光降解	降解程度高,清洁且成本低	受光照强度等因素制约	适用于四环素类等对光敏感的抗生素	在 TiO ₂ /ZnO 催化下,四环素去除率在 80% 以上	[46-47]
	氧化降解	快捷高效,稳定性好,降解彻底	产生二次污染,运行成本高	适用于少量高浓度抗生素废水的快速处理	四环素经臭氧化处理 4 min ~ 6 min 可被完全去除	[46,49]
生物法	微生物降解	绿色无二次污染,环境友好	易受水质影响	适用于大量抗生素废水的处理	对红霉素、四环素、土霉素的处理效率均在 90% 以上	[50-51]
	植物降解	安全绿色,易于维护,成本低廉	去除效率有限,应用范围小	适用于处理污染程度较轻的抗生素废水,可大面积使用	大藻植物对水中四环素和氨苄青霉素的去除率在 80% 以上,凤眼莲对水中四环素的去除率可达 90%	[52]

4 水产养殖中抗生素污染的源头控制策略

水污染控制手段通常包括源头防控、过程控制和末端治理,其中源头防控最具成效。清洁养殖作为一种新的创造性理念,于 20 世纪 90 年代被引入我国^[54],其可以提高养殖效率,并降低人类安全和环境风险。今基于清洁养殖理念,针对水产养殖中的抗生素污染提出以下源头防控建议。

(1) 合理用药,减量用药。使用抗生素具有一定的增产作用,而过量使用抗生素则会引发食品安全、环境污染等问题。建议加强从业人员培训,学习水产养殖中使用的抗生素药物名录,正确识别水产动物疾病,在确保渔药功效的同时,精准用药,杜绝使用违禁渔药,是避免抗生素盲目使用甚至滥用问题的关键。

(2) 遵守休药期规定。休药期是指水产品上市前停药的时间,除兽药类、维生素类渔药之外,其他渔药均有休药期。抗生素进入动物体内后,需要经过吸收、代谢等过程才能分解,用量超标,休药期也会随之增加。因此,应当在抗生素休药期方面加以限定。

(3) 研发推广绿色渔药。绿色渔药在有效防治水产病害的同时,不会对水环境造成威胁,而且

无残留。常见的绿色渔药有酶制剂、微生物制剂、化学消毒剂、中草药制剂等,可有效替代抗生素治疗,并克服使用抗生素产生抗药性的弊端。绿色生产重源头,建议推进绿色渔药的投入使用,从源头上减少抗生素污染的产生。

5 展望

(1) 探究水产养殖中抗生素的耐药机制、环境迁移转化途径及代谢降解产物。目前水产养殖中抗生素的生态毒性研究仍处于探索阶段,尽管通过表象已经确认水产养殖中的抗生素能通过食物链对人类造成危害,但仍缺乏更多证据及对其机理的研究。

(2) 探究新型绿色降解水产养殖中抗生素污染的技术。在现有研究基础上大力开发、深入挖掘新的复合修复技术,微生物降解虽然是一种高效无污染的降解手段,但仍受限于对抗生素的耐受性。

(3) 探究水产养殖中抗生素污染源头防治技术或工艺。开发新型抗生素污染控制手段,探索水产养殖工程中养殖条件对抗生素污染产生与迁移的影响机制,科学评估,杜绝滥用,源头阻断。

[参考文献]

- [1] 李十盛,高会,赵富强,等. 水产养殖环境中抗生素抗性基因的研究进展[J]. 中国环境科学,2021,41(11):5314-5325.
- [2] 王亚军,陈甜婧. 氟喹诺酮类抗生素在水环境中的去除研究综述[J]. 环境监测管理与技术,2021,33(5):1-5.
- [3] 耿冲冲,王亚军. 污水中抗生素生化去除研究进展[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(3):12-16.
- [4] CHEN J M,SUN R X,PAN C G, et al. Antibiotics and food safety in aquaculture[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2020,68(32):11908-11919.
- [5] 王明珠,陈玲,赵宏宇,等. 养殖对虾中抗生素的残留及其健康风险[J]. 环境监测管理与技术,2018,30(2):34-38.
- [6] 颜亚玮,於驰晟,李菲菲,等. 某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征[J]. 环境科学,2021,42(1):315-322.
- [7] YANG Y Y,SONG W J,LIN H, et al. Antibiotics and antibiotic resistance genes in global lakes:A review and meta-analysis[J]. Environment International,2018,116:60-73.
- [8] MO W Y,CHEN Z T,LEUNG H M, et al. Application of veterinary antibiotics in China's aquaculture industry and their potential human health risks[J]. Environmental Science and Pollution Research,2017,24(10):8978-8989.
- [9] ZHAO Y,YANG Q E,ZHOU X, et al. Antibiotic resistome in the livestock and aquaculture industries: Status and solutions[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2021,51(19):2159-2196.
- [10] 中华人民共和国农业农村部. 农业部公告第1435号[EB/OL]. (2010-08-23)[2022-06-15]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/gg/201008/t20100823_1622639.htm.
- [11] ZHAO X L,CHEN H,JIN Z H, et al. GC-MS-based metabolomics analysis reveals *L*-aspartate enhances the antibiotic sensitivity of neomycin sulfate-resistant *Aeromonas hydrophila* [J]. Journal of Fish Diseases,2018,42(12):1831-1841.
- [12] LOPES L F D,AGOSTINI V O,GUIMARAES S S, et al. Evaluation of the effect of antimicrobials in marine cultures, using the copepod *Acartia tonsa* as a bioindicator[J]. Chemistry and Ecology,2018,34(8):747-761.
- [13] 李兆新,董晓,孙晓杰,等. 渔业养殖环境中抗生素残留检测与控制技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2017,8(7):2678-2686.
- [14] LI Z J,YU X C,FU J Y, et al. Study on removal of oxytetracycline hydrochloride in marine aquaculture wastewater by $Zn_{0.75}Mn_{0.75}Fe_{1.5}O_4/ZnFe_2O_4/ZnO$ photocatalyst [J]. Water and Environment Journal,2021,35(4):1293-1301.
- [15] 周品成,刘希强,康兴生,等. 4种水生植物对兽用抗生素去除效果比较[J]. 华南农业大学学报,2019,40(6):67-73.
- [16] 潘明轩,李兆新,邢丽红,等. 甲砜霉素在鲤鱼中的药代动力学研究[J]. 渔业科学进展,2018,39(5):166-172.
- [17] GUO E H,ZHAO L C,WU K, et al. Simultaneous detection of three amphenicol antibiotics in shrimp and surface water samples by LC-MS/MS using two-antibodies-immobilized immunoaffinity clean-up technique [J]. Food and Agricultural Immunology, 2021,32(1):283-297.
- [18] AHMED M B M,ABDEL-RAHMAN G N,SALEM S H, et al. Incidence, stability and risk assessment for sulfonamides and tetracyclines in aqua-cultured Nile Tilapia fish of Egypt[J]. Toxicology Reports,2020,7:836-843.
- [19] 彭瑶,胡政宇,肖鹏,等. 紫球藻对沼液废水中氨氮、铜离子及抗生素磺胺二甲嘧啶的处理效果[J]. 生态与农村环境学报, 2020,36(9):1185-1191.
- [20] 张焕军,王席席,李轶,等. 水体中抗生素污染现状及其对氮转化过程的影响研究进展[J]. 环境化学,2022,41(4):1168-1181.
- [21] 张石云,宋超,陈家长,等. 喹诺酮类抗生素在水产养殖中应用的研究进展[J]. 江苏农业科学,2019,47(3):32-36.
- [22] KALASSERIL S G,RISHNAN R,VATTIRINGAL R K, et al. Detection of New Delhi metallo-beta-lactamase 1 and cephalosporin resistance genes among carbapenem-resistant enterobacteriaceae in water bodies adjacent to hospitals in India[J]. Current Microbiology,2020,77(10):2886-2895.
- [23] XIE J S,MEI H,JIN S, et al. Outbreak of vibriosis associated with *Vibrio parahaemolyticus* in the mud crab *Scylla paramamosain* cultured in China[J]. Disease of Aquatic Organisms,2021,144:187-196.
- [24] 王晓洁,赵蔚,张志超,等. 兽用抗生素在土壤中的环境行为、生态毒性及危害调控[J]. 中国科学:技术科学,2021,51(6):615-636.
- [25] ISIDORI M,LAVORGNA M,NARDELLI A, et al. Toxic and genotoxic evaluation of six antibiotics on non-target organisms [J]. Science of the Total Environment,2005,346:87-98.
- [26] CHENG J F,QIU H C,CHANG Z Y, et al. The effect of cadmium on the growth and antioxidant response for freshwater algae *Chlorella vulgaris* [J]. SpringerPlus,2016,5(1):1-8.
- [27] 范硕,张小娜,侯艳红,等. 抗生素对油菜种子及幼苗生物效应研究[J]. 种子,2022,41(4):86-90.
- [28] 魏瑞成,邵明诚,陈明,等. 金霉素和4-差向金霉素对油菜生长的影响及其在幼苗体内的积累[J]. 农业环境科学学报, 2012,31(7):1289-1295.
- [29] HANSON M L,KNAPP C W,GRAHAM D W. Field assessment of oxytetracycline exposure to the freshwater macrophytes *Egeria densa* Planch. and *Ceratophyllum demersum* L. [J]. Environmental Pollution,2006,141(3):434-442.
- [30] 侯力睿,傅榆涵,赵冲,等. 兽药抗生素对生态环境的混合毒性研究进展[J]. 环境化学,2021,40(1):55-64.
- [31] WOLLENBERGER L,HALLING-SORENSEN B,KUSK K O, et al. Acute and chronic toxicity of veterinary antibiotics to *Daphnia magna* [J]. Chemosphere,2000,40:723-730.
- [32] QIU W H,LIU X J,YANG F, et al. Single and joint toxic effects of four antibiotics on some metabolic pathways of zebrafish (*Danio rerio*) larvae [J]. Science of the Total Environment,2020,716:137062.
- [33] OKOCHA R C,OLATOYE I O,ADEDEJI O, et al. Food safety

- impacts of antimicrobial use and their residues in aquaculture [J]. *Public Health Rev*, 2018, 39: 1–22.
- [34] 舞德春, 许振成, 吴根义, 等. 四环素类抗生素的环境行为研究进展[J]. *动物医学进展*, 2011, 32(4): 98–102.
- [35] VALDERAS M W, ANDA B, BARROW W W, et al. Examination of intrinsic sulfonamide resistance in *Bacillus anthracis*: a novel assay for dihydropteroate synthase [J]. *Biochimica et Biophysica Acta-Biomembranes*, 2008, 1780(5): 848–853.
- [36] KONG W D, ZHU Y G, FU B J, et al. The veterinary antibiotic oxytetracycline and Cu influence functional diversity of the soil microbial community [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143(1): 129–137.
- [37] LAXMINARAYAN R, DUSE A, WATTAL C, et al. Antibiotic resistance—the need for global solutions [J]. *Lancet Infectious Diseases*, 2013, 13(12): 1057–1098.
- [38] 梁惜梅, 聂湘平, 施震, 等. 珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(10): 4073–4080.
- [39] 程宪伟, 梁银秀, 于翔霏, 等. 水体中抗生素污染及其处理技术研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(1): 125–132.
- [40] LI X N, SONG Y, JIA M Y, et al. A review of researches on biochar adsorbing organic contaminants and its mechanism [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54: 1313–1325.
- [41] TIAN S Q, WANG L, LIU Y L, et al. Enhanced permanganate oxidation of sulfamethoxazole and removal of dissolved organics with biochar: Formation of highly oxidative manganese intermediate species and in-situ activation of biochar [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(9): 5282–5291.
- [42] 陈经纶, 李焯, 黄国琼, 等. 不同粒径海洋微塑料对左氧氟沙星的吸附行为研究 [J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(3): 331–340.
- [43] 余子贤, 赵婧滢, 饶培源, 等. 静态水环境中抗生素赋存状态和迁移转化规律 [J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(7): 904–908.
- [44] LOFTIN K A, ADAMS C D, MEYER M T, et al. Effects of ionic strength, temperature, and pH on degradation of selected antibiotics [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(2): 378–386.
- [45] 张杏艳, 陈中华, 邓海明, 等. 水环境中四环素类抗生素降解及去除研究进展 [J]. *生态毒理学报*, 2016, 11(6): 44–52.
- [46] 李伟明, 鲍艳宇, 周启星, 等. 四环素类抗生素降解途径及其主要降解产物研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2300–2308.
- [47] REYES C, FERNANDEZ J, FREER J, et al. Degradation and inactivation of tetracycline by TiO₂ photocatalysis [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2006, 184(2): 141–146.
- [48] 赵芙蓉, 王飞, 耿环环, 等. pH 和溶解性有机质对磺胺甲恶唑光降解的影响 [J]. *环境工程学报*, 2019, 13(2): 356–364.
- [49] LIU Y Q, HE X X, FU Y S, et al. Kinetics and mechanism investigation on the destruction of oxytetracycline by UV-254 nm activation of persulfate [J]. *J Hazard Mater*, 2016, 305: 229–239.
- [50] 闫雷, 梁斌, 王爱杰, 等. 微生物降解磺胺甲恶唑的研究进展 [J]. *微生物学报*, 2020, 60(12): 2747–2762.
- [51] 刘元望, 李兆君, 冯瑶, 等. 微生物降解抗生素的研究进展 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 212–224.
- [52] 陈姗, 许凡, 张玮, 等. 磺胺类抗生素污染现状及其环境行为的研究进展 [J]. *环境化学*, 2019, 38(7): 1557–1569.
- [53] 钟雪晴, 朱雅莉, 王玉娇, 等. 含抗生素废水的微藻处理技术及其进展 [J]. *化工进展*, 2021, 40(4): 2308–2317.
- [54] 刘和旺, 张双. 清洁生产政策对我国企业转型升级的影响 [J]. *湖北大学学报(哲学社会科学版)*, 2019, 46(6): 154–163.

· 简讯 ·

四部门联合印发考核指标评分细则 我国将为长江流域水生态“打分”

近日,生态环境部、国家发展改革委、水利部、农业农村部等四部门联合印发《长江流域水生态考核指标评分细则(试行)》,开展长江流域水生态考核试点工作。

长江流域水生态考核范围为青海、四川、西藏、云南、重庆等 17 省份,涉及长江干流、主要支流、重点湖泊和水库等 50 个水体。考核工作聚焦长江流域突出生态环境问题,兼顾长江源头及上、中、下游特点,从国内外已有应用基础的近 200 项指标中,筛选出有成熟监测方法的 14 项,构建了以水生态系统健康为核心,以水生态环境保护、水环境保护、水资源保障为支撑的考核指标体系,并按河流、湖泊、水库进行分类评价。

生态环境部长江流域生态环境监督管理局局长徐翀说,长江流域水生态考核以正向激励为主,综合考虑现状评价得分与变化幅度评价得分两个因素确定省域水生态综合评价得分。其中以变化幅度评价为主,将变化幅度评价得分赋予较高的权重,压实水生态保护修复责任。

摘自 <http://sthjt.jiangsu.gov.cn> 2023-07-12