

水环境中 PPCPs 的识别·风险评价与控制技术综述

任丙南^{1,2}

(1. 三亚学院翟明国院士工作站, 海南三亚 572000; 2. 三亚学院健康产业管理学院, 海南三亚 572000)

摘要 药物和个人护理用品 (pharmaceutical and personal care products, PPCPs) 作为一类新兴的污染物, 在环境中的存在、迁移已引起特别关注, 成为环境领域热点研究方向。综述液相色谱-质谱联用、气相色谱-质谱联用两类分析检测技术的选择、应用和发展, 风险评价重难点和风险评价方法的选择, 活性污泥法、膜处理工艺、碳吸附法等常用控制技术的研究进展。指出水环境中 PPCPs 污染物识别的标准体系不完善、方法不统一, 风险评价无法全面、客观与准确地反映 PPCPs 的生态影响, 控制技术还需进一步加强和提升。

关键词 PPCPs; 污染物识别; 风险评价; 控制技术

中图分类号 X 824 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)07-0010-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.07.003

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Overview of PPCPs Identification, Risk Assessment and Control Technology in Water Environment

REN Bing-nan^{1,2} (1. ZHAI Mingguo Academician Workstation, University of Sanya, Sanya, Hainan 572000; 2. School of Health Industry Management, University of Sanya, Sanya, Hainan 572000)

Abstract Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) are receiving public concerns and scientific interest since they were as the emerging pollutants. This paper reviews the selection, application and development of liquid chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-mass spectrometry, key and difficult points of risk assessment and selection of risk assessment methods, research progress of common control technologies such as activated sludge process, membrane treatment process and carbon adsorption process. It is pointed out that the standard system of PPCPs pollutant identification in water environment is not perfect and the methods are not unified. The risk assessment cannot comprehensively, objectively and accurately reflect the ecological impact of PPCPs. And the control technology needs to be further strengthened and improved.

Key words Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs); Pollutant identification; Risk assessment; Control technology

人类活动引起的水环境问题一直是全球变化研究的热点和学术前沿。当前, 研究者对人类活动产生的水体污染物的关注不再局限于传统的污染物, 而是延伸到与人类日常生活密切相关的新兴污染物, 如药品及个人护理用品 (pharmaceuticals and personal care products, PPCPs)。大多数 PPCPs 具有易溶于水、弱挥发性、难降解和生物累积性的特点, 在低剂量长期暴露下对生物将产生内分泌干扰效应、发育毒性和生殖毒性, 对生态系统和人类健康形成威胁^[1]。PPCPs 在环境中主要通过水相传递, 虽然半衰期较持久性有机污染物短, 但由于人类活动中大量频繁使用, 使水环境中 PPCPs 呈现出“持续存在”的状态, 在水环境中的生态毒性仍然不容小觑^[2-3]。农作物的生长发育离不开水体灌溉, 灌溉用水中残留的 PPCPs 会导致农作物生长受影响, 并伴随着农作物的食物链传递, 进而影响人类健康。因此, 该研究对水环境中 PPCPs 污染物的识别、风险评价与控制技术的研究进展进行了综述, 分析研究现状, 指出存在的问题和研究展望, 为该领域学术研究提供参考。

1 水环境中 PPCPs 污染物的识别

先进的分析检测技术, 是有效识别与去除 PPCPs 污染物的前提和基础, 有利于增强 PPCPs 处理效率, 实现目标污染物的精准去除。现阶段水环境 PPCPs 污染物识别技术主要采用质谱联用分析技术 (HPLC/MS)、气相色谱与质谱技术 (GC/MS) 两大类。其中, HPLC/MS 技术一般适用于如阿司匹林、咖啡因、双氯芬酸等具有亲水性、挥发性差与极性强

的物质检测; GS/MS 技术一般适用于如多环芳族碳氢化合物等挥发性强、极性弱的物质检测^[4]。也有学者根据 PPCPs 组分 $\log K_{ow}$ 值的不同选择检测方法, 如 Singh 等^[5] 提出 $\log K_{ow}$ 值在 $-2.10 \sim 3.18$ 的 PPCPs 污染物适宜采用 HPLC/MS 检测, 如退热净、双氯芬酸、咖啡因、碘普罗胺、碘氨类药物、立痛定等; $\log K_{ow}$ 值在 3.18 以上的 PPCPs, 适宜采用 GC/MS 检测领域, 如加乐麝香、麝香酮等物质。采用 $\log K_{ow}$ 进行 PPCPs 检测方法的区分, 使得 PPCPs 检测方法的选择更为精准。

HPLC/MS 质谱联用分析技术以较强的专属性、极高的灵敏度、高分离能力属性, 在水环境 PPCPs 污染物检测中表现出良好的应用前景, 其基本原理为选取具有分离功能的仪器为质谱仪的“进样器”, 将 PPCPs 分离为纯组分导入质谱仪, 利用质谱仪获取 PPCPs 组分的分子量、分子结构特征^[6]。为验证 HPLC/MS 技术用于 PPCPs 识别的可行性, 国内外学者通过文献研究、量化研究、实验分析、定性阐述等多种手段, 进行技术的研究论证。吴刚等^[7] 以污水处理环境为例, 采用 HPLC/MS 构建了 PPCPs 转化产物识别分析流程框架, 主要包含样品获取 (实验室小试、污水厂采样)、样品前处理 (固相萃取、固相微萃取、液液萃取)、样品检测 (DDA、DIA、离子淌度)、数据分析 (可疑物筛查、非靶向筛查), 该流程基本体现了污水环境中 PPCPs 的转化特征, 明确了 PPCPs 在各个阶段转化产物识别的关键技术。张盼伟等^[8] 采用 HPLC/MS 技术, 建立了阿奇霉素、林可霉素、卡马西平等 10 种 PPCPs 化合物的检测方法, 该检测方法对于 PPCPs 化合物检测有着较好的适用性, 且回收率与检测效率高。Hao 等^[9] 通过总结近 7 年 HPLC/MS 的检测分析方法, 认为在常

基金项目 海南省自然科学基金项目 (420RC673)。

作者简介 任丙南 (1978—), 男, 山西太原人, 教授, 博士, 从事污染物的污染行为与环境效应研究。

收稿日期 2022-09-08

规的 PPCPs 组分分析中,样品制备、采样程序是薄弱环节,而在检测过程中,关于样品检测限度相关的数值同样是影响检测精准性的关键,这些是 HPLC/MS 检测分析的一个难点。

在 GC/MS 气相色谱质谱技术层面,国内外学者开展了大量的研究工作,研究重点主要涉及 PPCPs 组分检测原理、检测步骤、检测成效等。GC/MS 属于分离科学研究范畴,通过对 PPCPs 污染物中的化学成分分离,测定不同化学成分的含量,在水环境药物检测中表现出较高的灵敏度与可靠性,但 GC/MS 由于自身技术条件的限制,对于检测物质组分的性质也有着一定的要求^[10]。Abdul Mottaleb^[11]以洗漱用品二甲苯麝香为例,发现 GC/MS 适合易挥发、憎水性的 PPCPs 成分检测,而对于亲水性、极性强的物质则难以保证检测效果。杨林等^[12]建立了具体的 PPCPs 污染物检测流程,可同时多个目标污染物成分测定,经实验分析平均回收率达到了 89.81%,最低检测限 10~40 ng/L。Usenko 等^[13]认为 PPCPs 等污染物检测技术的发展离不开检测技术和样品制备技术优化及定量分析技术的支持,来提升 GC/MS 检测分析的效率与精确度。

基于 HPLC/MS、GC/MS 两大 PPCPs 技术的研究基础,一些学者对 PPCPs 污染物检测技术进行了改良优化。贺德春等^[14]提出了一种新的地下水系统 PPCPs 污染源识别方法,解决了传统 PPCPs 污染源识别中存在的计算模型复杂、需大量数据运算、识别范围有限的缺陷。隋信等^[15]基于排放源特征指数设计了 PPCPs 污染源溯源识别方法,基本原理为:对不同排放源的 PPCPs 进行筛选,利用数学模型的构建与推导,获得不同污染源占据混合样品总数的百分比,从而对地表水中的 PPCPs 污染物进行定量溯源与快速识别。这些技术的运用,是对常规 PPCPs 污染物识别技术的补充与拓展,为 PPCPs 污染物识别技术的发展与技术创新打下了坚实的基础。

2 水环境中 PPCPs 的风险评价

绝大多数水环境中的 PPCPs 浓度低,急性毒性发生概率低,但由于长期存在产生毒理效应的积累,对微生物、动物及人类存在慢性毒性的可能。以抗生素类药物为例,水中残留会抑制微藻类微生物叶绿体及蛋白质的合成,导致生态湿地、河道生态堤岸两侧的植物发芽率受影响^[16]。PPCPs 对动物及人体都有着不可忽视的生态毒性。Kar 等^[17]以大量水生生态毒理学实验数据为基础,对 226 种抗生素在水环境中的生态毒性进行评价,发现 44.00% 的抗生素具有危害性,16.00% 的抗生素具有剧毒性,50.00% 的抗生素具有毒害作用,33.33% 的抗生素有着较强的毒性,多数抗生素类 PPCPs 的生物富集作用强,易深入人体及动物细胞,表现出一定的细胞毒性。对水环境中的 PPCPs 进行科学的风险评价,成为制定有效控制措施的前提。在 PPCPs 风险评价方面,研究者致力于构建健全的 PPCPs 风险评价体系,研究主要聚焦风险评价的重难点、风险评价方法等。

为了更有效地评价 PPCPs 污染物的生态风险,研究者从 PPCPs 组分类型、迁移转化机制、生态影响的角度,开展了

针对性的研究工作。由于 PPCPs 种类繁多,对于 PPCPs 污染物的生态风险,不能仅以去除率作为评价的依据,还要综合考虑气候、环境以及 PPCPs 的性质等因素形成的综合影响,这是风险评价的重点和难点。Lin 等^[18]以饮用水处理厂为例,通过对 39 种 PPCPs 发生、去除过程的系统化监测,选取罗红霉素和磺胺甲恶唑 2 种 PPCPs 为参考性指标,发现不同 PPCPs 的风险有着明显的差异,由于 PPCPs 去除效率无法反映单个 PPCPs 的风险控制,去除率无法表征风险评价的效果。Gopal 等^[19]发现季风期沉积物稀释和后期沉积物的吸附因素,均会影响目标 PPCPs 的测定结果,在风险评价中要考虑季节、温度、环境等因素。王丽等^[20]对东江下游 PPCPs 污染物进行风险评估,研究以水杨酸、布洛芬、双氯芬酸、甲芬酸、萘普生等非甾体类抗炎药和氯纤维酸等脂质调节剂为样本,认为 PPCPs 在风险评价中应考虑 PPCPs 的性质、分布特征等对生态环境的微观及宏观影响。

风险评价方法的选择对于 PPCPs 风险评价的结果影响很大。目前较多采用的评价方法是风险熵值法、全生命周期等。张智博等^[21]对水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征进行分析,开展了健康风险及生态风险评价,虽然健康风险熵值(HQ)<1,但环境中长期排放与积累的状况,PPCPs 的风险程度可能上升。张芹等^[22]测定了骆马湖水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征,采用风险熵值法评价了生态环境风险,并利用单叠加模型计算 PPCPs 的联合毒性风险熵,评价了对水生生物和人体健康的影响。De García 等^[23]以生命周期评估理论(LCA)开展了 PPCPs 对淡水及人类的潜在生态毒理影响,PPCPs 的生态蓄积性、降解速率、物理化学特性等是 PPCPs 风险评价的核心因素。Ngo 等^[24]以半定量风险评估方法对越南某河流内的 PPCPs 的生态风险进行了评估,PPCPs 对水生生物的潜在生态风险为中等风险,需着重对中等风险的 PPCPs 进行监测和控制。大量的研究已经证实 PPCPs 对微生物的生长和生存有着直接或间接的影响。PPCPs 在环境中的存在、迁移转化非常复杂,水环境中存在 PPCPs 污染物是否对人体有显著健康影响,目前学术界仍需进行进一步的深入研究,但普遍认可不断积累的 PPCPs 已经成为人体健康的威胁因素。

3 水环境中 PPCPs 污染物的控制技术

近年来,水环境中 PPCPs 污染物的去除与控制受到了研究者的高度重视,其中活性污泥法、膜处理工艺、碳吸附法是当前研究的重点。

活性污泥法去除技术是利用聚合物、多孔结构的絮体状污泥,将 PPCPs 进行吸附处理,以达到降低 PPCPs 浓度与生态危害的目的。Salgado 等^[25]采用了活性污泥法吸附 PPCPs,研究表明多数 PPCPs 污染物在活性污泥法吸附处理中,取得了良好的效果,少数 PPCPs 污染物无法利用该方法予以去除。Deng 等^[26]的活性污泥法去除 PPCPs 试验,表明该方法并不能适用于全部样品的污染物去除,如甲氧苄氨嘧啶和卡马西平。李想等^[27]建立了生物膜模型和活性污泥模型,预测污水中 PPCPs 的去除率,研究中通过微生物组分的

确定、动力学方程与参数校准优化探明了不同微生物对 PPCPs 的降解性能与污水中 PPCPs 的生物降解机制,认为活性污泥法等 PPCPs 去除方法的运用,应注重微生物组分、数学模型建立方法及关键参数确定与校准,以保证 PPCPs 的去除效率。

不同于活性污泥法通过吸附的方式去除污泥,膜处理工艺可通过超滤、微滤、纳滤、反渗透等多元化的手段降低 PPCPs 浓度^[25]。膜处理技术与常规 PPCPs 去除技术相比,膜处理技术具有经济节能、运行稳定的优势,但膜处理技术同时也有着成本高和二次污染的不足,这给膜处理技术的选择和应用带来了挑战^[28]。

碳吸附法也是 PPCPs 污染物去除的重要技术,由于不少 PPCPs 中具有易于被吸附的胺基和苯环成分,活性炭吸附可以快速、高效地去除 PPCPs。Zhang 等^[29]研究发现,粉状活性炭与颗粒状活性炭在饮用水 PPCPs 去除中,均表现出了较好的吸附效果,去除率达到了 90% 以上,但吸附效率有时会受到水环境中天然有机物的影响。同时活性炭吸附法与同类技术相比,在去除过程无副产物产生,其去除效率主要受到活性炭颗粒大小、疏水性、电荷及吸附剂表面化学特性、空间结构的影响^[30]。

除上述 PPCPs 去除技术以外,学术界还提出了人工湿地法处理 PPCPs 污染物的研究实践,人工湿地法处理时出水水质稳定、工艺简单,但投资成本高昂,且占地面积大,而且需要配套人工湿地的建设,常常会因场地条件的限制,难以起到理想的去除效果^[27]。

4 问题与展望

虽然学术界在水环境 PPCPs 污染物识别、风险评价与干预对策研究中,取得了丰硕的成果,但还存在一系列的问题:

(1) 现阶段水环境中 PPCPs 污染物识别的理论研究不成熟,标准体系不完善,导致在实践中方法不统一,未有明确的标准制约,PPCPs 识别的精准性与可靠性还有待进一步提升。

(2) 当前 PPCPs 污染物风险评价的手段相对单一,欠缺先进的技术体系支持,尤其是数学模型法、定量分析评价手段不足,无法全面、客观与准确地反映 PPCPs 的生态影响。

(3) 目前关于何种 PPCPs 污染物去除方法与干预措施更为行之有效,还未有明确的定论,这将是研究有待加强和提升的方向。

在未来的 PPCPs 领域研究中,应着眼于 PPCPs 污染物识别、风险评价、控制技术研究的缺陷与不足,依托 PPCPs 污染物识别行业标准的构建、系统性的风险评价及多元化的控制措施,不断丰富和拓展现行的理论体系,力争为水环境中 PPCPs 风险的控制与监测提供参考依据。

参考文献

[1] MACKAY D, BARNTHOUSE L. Integrated risk assessment of household chemicals and consumer products: Addressing concerns about triclosan [J]. *Integrated environmental assessment & management*, 2010, 6(3): 390-392.

[2] 王丹,隋倩,赵文涛,等. 中国地表水环境中药物和个人护理品的研究进展[J]. *科学通报*, 2014, 59(9): 743-751.

[3] BRAUSCH J M, RAND G M. A review of personal care products in the aquatic environment: Environmental concentrations and toxicity[J]. *Chemosphere*, 2011, 82(11): 1518-1532.

[4] 吴颖虹,张国华,汪磊. 水体中药物和个人护理品污染监测分析[J]. *中国公共卫生*, 2009, 25(11): 1291-1293.

[5] SINGH G, SINGH A, SINGH P, et al. Sources, fate, and impact of pharmaceutical and personal care products in the environment and their different treatment technologies[M]//KUMAR A, SINGH V K, SINGH P, et al. *Microbe mediated remediation environment contaminants* Duxford: Woodhead Publishing, 2021.

[6] 殷哲云,闵露娟,金立涛,等. HPLC-MS/MS 测定 3 类污水处理厂污泥及污水中的 8 种药物[J]. *环境化学*, 2018, 37(8): 1720-1727.

[7] 吴刚,耿金菊,李想,等. 污水生物处理过程药品及个人护理品转化产物识别研究进展[J]. *环境化学*, 2022, 41(1): 57-69.

[8] 张盼伟,赵高峰,周怀东,等. 超声波萃取-高效液相色谱-串联质谱同时测定沉积物中 10 种 PPCPs 化合物[J]. *中国环境监测*, 2014, 30(1): 138-143.

[9] HAO C Y, ZHAO X M, YANG P. GC-MS and HPLC-MS analysis of bioactive pharmaceuticals and personal-care products in environmental matrices [J]. *Trac trends in analytical chemistry*, 2007, 26(6): 569-580.

[10] RUBAYE D, SANCHEZ A, YONKOS L, et al. Investigating the sorption of pharmaceutical and personal care products on high-density polyethylene and polypropylene microplastics [R]. 2020.

[11] ABDUL MOTTALEB M A. Use of LC-MS and GC-MS methods to measure emerging contaminants pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in fish [J]. *Journal of chromatography & separation techniques*, 2015, 6(3): 1-9.

[12] 杨林,李科林,赵高峰,等. 环境样品中药物和个人护理品的分析检测方法[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2011, 31(5): 41-42.

[13] USENKO S, SUBEDI B, AGUILAR L, et al. High-throughput analysis of PPCPs, PCDD/Fs, and PCBs in biological matrices using GC-MS/MS [J]. *Comprehensive analytical chemistry*, 2013, 61: 143-158.

[14] 贺德春,杨剑,吴根义,等. 一种地下水系统中新型污染物的污染源识别方法与应用: CN201711295981.7 [P]. 2018-05-08.

[15] 隋倩,梅雪冰,冯声涯,等. 一种基于排放源特征指数的地表水中药物和个人护理品溯源方法: CN201910860388.5 [P]. 2020-02-07.

[16] PAROLINI M, PEDRIALI A, BINELLI A. Application of a biomarker response index for ranking the toxicity of five pharmaceutical and personal care products (PPCPs) to the bivalve *Dreissena polymorpha* [J]. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 2013, 64(3): 439-447.

[17] KAR S, SANDERSON H, ROY K, et al. Ecotoxicological assessment of pharmaceuticals and personal care products using predictive toxicology approaches [J]. *Green chemistry*, 2020, 22(5): 1458-1516.

[18] LIN T, YU S L, CHEN W. Occurrence, removal and risk assessment of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP) around Taihu Lake in China [J]. *Chemosphere*, 2016, 152: 1-9.

[19] GOPAL C M, BHAT K, RAMASWAMY B R, et al. Seasonal occurrence and risk assessment of pharmaceutical and personal care products in Bengaluru rivers and lakes, India [J/OL]. *Journal of environmental chemical engineering*, 2021, 9(4) [2022-04-25]. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105610>.

[20] 王丽,陈凡,易皓,等. 东江下游药物和个人护理品污染特征及风险评估[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(6): 79-85.

[21] 张智博,段艳平,沈嘉豪,等. 长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估 [J]. *环境科学*, 2022, 43(1): 349-362.

[22] 张芹,张圣尧,汪贞,等. 骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估 [J]. *环境科学*, 2017, 38(1): 162-169.

[23] DE GARCÍA S O, GARCÍA-ENCINA P A, IRUSTA-MATA R. The potential ecotoxicological impact of pharmaceutical and personal care products on humans and freshwater, based on USEtoxTM characterization factors. A Spanish case study of toxicity impact scores [J]. *The science of the total environment*, 2017, 609: 429-445.

[24] NGO T H, VAN D A, TRAN H L, et al. Occurrence of pharmaceutical and personal care products in Cau River, Vietnam [J]. *Environmental science and pollution research*, 2021, 28(10): 12082-12091.

笔者将农业灌水的劳动力成本单独核算,就是基于这类经营主体
主体的劳动力成本越来越高,旨在呼吁国家出台相关政策,切实保障此类经营主体。

表 5 不同灌水处理、种植密度对阳光 18 经济效益的影响

Table 5 Effects of water treatment and density treatment on economic performance of Yangguang 18

处理 Treatment	处理编号 Treatment code	生产投入 Production input//元/hm ²											生产收入 Production income				
		种子 Seed				旋地 Rotation	播种 Sowing seeds	肥料 Fert- ilizer	水电费 Water and electricity fee	农药费 Pest- icide cost	人工费 Cost of labor	收获 Harv- esting	合计 Total	产量 Yield kg/hm ²	单价 Unit price 元/hm ²	经济收入 Economic income 元/hm ²	纯收入 Net income 元/hm ²
		地租 Land rent	播量 Sowing amount	单价 Unit price	费用 Expense												
主处理 (灌水次数)	W2	4 500	138.75	4.4	610.50	900	375	2 250	750	600	4 800	900	15 685.50	8 553.45	2.5	21 383.63	5 698.13
	W1	4 500	138.75	4.4	610.50	900	375	2 250	375	600	4 200	900	14 710.50	8 215.05	2.5	20 537.63	5 827.13
Main treatment	W0	4 500	138.75	4.4	610.50	900	375	2 250	0	600	3 600	900	13 735.50	6 052.35	2.5	15 130.88	1 395.38
副处理 (密度)	T1	4 500	92.40	4.4	406.56	900	375	2 250	375	600	4 200	900	14 506.56	7 079.25	2.5	17 698.13	3 191.57
	T2	4 500	138.75	4.4	610.50	900	375	2 250	375	600	4 200	900	14 710.50	7 782.00	2.5	19 455.00	4 744.50
Sub-treatment	T3	4 500	184.95	4.4	813.78	900	375	2 250	375	600	4 200	900	14 913.78	7 959.45	2.5	19 898.63	4 984.85

参考文献

- [1] 陆贇曾. 山东小麦遗传改良[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 1.
- [2] 任玉芬, 苏小婉, 贺玉晓, 等. 中国生态地理区城市水资源利用效率及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6459-6471.
- [3] 冯素伟, 张保军, 谢惠民, 等. 灌水和非灌水条件下冬小麦水分的利用特点研究[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(5): 84-87.
- [4] 宋秋英, 赵德芳, 刘恩民, 等. 鲁西北灌区农业水资源特征及评价方法刍议[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(S1): 112-116.
- [5] 葛连兴, 李迎春, 彭正萍, 等. 基于 DSSAT 模型河北省冬小麦优化栽培管理方式模拟研究[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(2): 18-23.
- [6] 王德轩, 张正斌, 柴守玺, 等. 高产小麦合理群体和个体动态结构[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988(2): 94-104.
- [7] 李伟华, 张静, 郭振升, 等. 种植密度对“百农 418”小麦群体动态、产量及农艺性状的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(12): 1-6.
- [8] 由海霞. 不同密度小麦群体的光合作用特性研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(4): 162-165.
- [9] 郭志广. 农村劳动力外流与粮食安全研究: 从冲突到一致的路径选择和制度安排[D]. 成都: 西南财经大学, 2013.
- [10] 景俊生. 大中型农业滴灌设计现存问题及改进建议[J]. 农业技术与装备, 2021(10): 15-16.
- [11] 胡琴, 陈为峰, 宋希亮, 等. 不同灌水量对黄河三角洲盐碱地改良效果研究[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 305-310, 325.
- [12] 姚艳春, 刘元义, 牛国栋, 等. 山东旱作灌区小麦-玉米全程机械化技术模式经济效益分析与评价方法[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(12): 6-11.
- [13] 殷海善, 石莎, 秦作霞. 劳动力成本上升对农业生产的影响[J]. 山西农业科学, 2012, 40(9): 1003-1005.
- [14] 王成超, 李宝红, 王柏方. 小麦新品种阳光 18 节水条件下适宜密度探讨[J]. 农业科技通讯, 2020(4): 28-30.
- [15] 张秀, 朱文美, 董述鑫, 等. 灌水量与密度互作对冬小麦籽粒产量和水充分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 163-174.
- [16] 辛秀竹, 石怡彤, 张璐鑫, 等. 土壤耕作与春季灌水次数对冬小麦产量要素与经济效益的影响[J]. 节水灌溉, 2021(10): 18-23.
- [17] 郭振清, 刘添, 张敏, 等. 减少灌水次数对河北冬性强筋小麦产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(6): 731-737.
- [18] 高振贤, 史占良, 韩然, 等. 不同灌水模式对小麦产量、形态和生理特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(10): 1234-1240.
- [19] 马东钦, 王晓伟, 朱有朋, 等. 播种期和种植密度对小麦新品种豫农 202 产量构成的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(1): 91-94.
- [20] 谢荣, 刘志清, 张东志, 等. 播种密度对新研 7 号小麦产量及构成因素的影响[J]. 农业科技通讯, 2021(12): 72-74.
- [21] 于振文. 不同密度条件对冬小麦小花发育的影响[J]. 作物学报, 1984, 10(3): 185-194.
- [22] 朱云集, 郭汝礼, 郭天财, 等. 行距配置与密度对兰考 906 群体质量及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(2): 62-66.
- [23] 姜蕾. 水环境中 PPCPs 类新型污染物监测及控制技术展望: 新型污染物监测平台、污染源识别及末端控制[J]. 净水技术, 2016, 35(6): 1-5.
- [24] ZHANG Z X, ZHANG D D, ZHANG X. Simultaneous determination of pharmaceutical and personal care products in wastewater by capillary electrophoresis with head-column field-amplified sample stacking[J]. Analytical methods, 2014, 6(19): 7978-7983.
- [25] SALGADO R, MARQUES R, NORONHA J P, et al. Assessing the diurnal variability of pharmaceutical and personal care products in a full-scale activated sludge plant[J]. Environmental pollution, 2011, 159(10): 2359-2367.
- [26] DENG Y, LI B, YU K, et al. Biotransformation and adsorption of pharmaceutical and personal care products by activated sludge after correcting matrix effects[J]. Science of the total environment, 2016, 544: 980-986.
- [27] 李想, 耿金菊, 吴刚, 等. 活性污泥和生物膜模型预测污水中 PPCPs 去除研究进展[J]. 环境化学, 2022, 41(3): 918-928.
- [28] BERETTA M, BRITTO V, TAVARES T M, et al. Occurrence of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in marine sediments in the Todos os Santos Bay and the north coast of Salvador, Bahia, Brazil[J]. Journal of soil & sediments, 2014, 14(7): 1278-1286.

(上接第 12 页)