

Liu Y Y, Zhao Y Q, Shen C, *et al.* Crop-wetland: a kind of constructed wetland owning multi-functions [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(10): 102516. [刘叶叶, 赵亚乾, 沈澄, 等. 作物湿地: 一种多功能人工湿地 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(10): 102516.]

综述

作物湿地: 一种多功能人工湿地

刘叶叶¹ 赵亚乾¹ 沈澄^{2,3} 卫婷¹

(1. 西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室, 西安 710048; 2. 浙江科技大学环境与资源学院, 杭州 310023;
3. 浙江科技大学浙江省废弃生物质循环利用与生态处理技术重点实验室, 杭州 310023)

摘要: 作物湿地是一种融合人工湿地与农业生产的复合生态系统, 通过充分利用湿地的水文特性和生物净化功能, 在污水处理与作物生长之间实现了优化平衡, 从而缓解传统农业对生态环境的压力, 推动农业与环境的可持续发展。研究系统分析了相关文献, 对作物湿地的植被类型、设计方式及污染物去除效率进行了深入探讨。结果显示, 水稻是作物湿地中最常见的植物, 而湿地类型主要采用表面流(51.90%)、水平流(33.30%)和浮岛(11.10%)设计, 垂直流的应用较少(3.70%)。作物湿地在水质净化、养分回收、综合农业等方面展现出多重功能, 更适用于低浓度污水的处理, 其处理性能与传统表面流相当。尤其在营养元素回收利用和农业综合发展方面, 作物湿地具有更显著的优势。未来研究应进一步优化作物湿地的设计与管理, 重点关注病原微生物、新污染物和重金属等潜在风险, 确保食品安全和环境健康, 从而更好地实现农业与生态系统的协调发展。

关键词: 人工湿地; 稻田; 农作物; 氮磷; 资源回收

中图分类号: X171.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)10-102516-12

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2024.0453 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.2024.0453



人工湿地作为基于自然的解决方案(Nature-Based Solutions)的代表性技术, 综合具有污水净化、生物多样性保护、涵养水源、蓄洪抗旱、回收资源等多种生态功能, 对于加强水生态环境保护修复、促进区域再生水循环利用和推进生态文明建设具有重要意义^[1,2]。自然资源利用和环境保护息息相关, 然而, 传统农业在追求高产的同时, 对生态系统也造成了显著的压力, 包括水体富营养化、土壤质量下降以及生物多样性丧失等问题^[3,4]。因此, 如何在农业生产中融入生态保护理念, 平衡经济效益与环境可持续性, 已成为当前研究和实践的重要课题。

在此背景下, 作物湿地应运而生, 并成为一种将人工湿地技术与农业生产相结合的复合生态系

统模式。作物湿地利用湿地的水文特性、生态功能以及植物的净化作用, 不仅能够实现对污水的高效净化, 还能通过种植经济作物, 如水稻、芦苇、香蒲, 各种花卉, 莲藕或水生蔬菜, 以提供经济收益^[5,6]。这种技术的核心在于优化湿地和农田系统的协同效应, 实现生态功能与生产功能的兼容。例如, 作物湿地能够在处理生活污水或农业径流的同时, 提供优质灌溉水源, 从而降低农业用水对环境的影响^[7]。作为一种可持续发展的创新模式, 作物湿地为农业生产与生态保护的协同发展提供了新思路, 充分体现了绿色经济和生态文明建设的理念。

然而, 目前关于作物湿地的研究多集中于作物的生长, 而对其湿地功能的研究相对不足。本文基

收稿日期: 2024-11-22; 修订日期: 2025-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(42377086和42403056)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (42377086 and 42403056)]

作者简介: 刘叶叶(1999—), 女, 硕士研究生; 研究方向为基于人工湿地的水生态修复。E-mail: 1436690411@qq.com

通信作者: 赵亚乾, E-mail: yzhao@xaut.edu.cn

于湿地功能的视角,通过在Web of Science、Google Scholar和知网平台上,以“crop wetland”“vegetated wetland”“constructed wetlands vegetation”“作物湿地”“稻田湿地”等为关键词进行文献检索,共筛选出23篇相关研究文献。通过对这些文献的分析,重点统计了进水水质、植被类型、污染物去除率等指标,并系统梳理了作物湿地的特征、应用范围及功能特点。

1 作物湿地特征

作物湿地是人工湿地的一种特殊形式,融合了传统农业与生态工程的优势,在湿地结构设计和运行模式上展现出独特特征。作物湿地是指在人工湿地系统中种植经济作物,以提升水质净化效果为目的,同时实现资源回收利用的复合型生态工程。

基于表1的统计数据,从植物类型、湿地构造及其适用的水质处理范围等方面,对作物湿地的特点进行了详细探讨。

1.1 植物类型

通过对文献的统计分析发现,作物湿地中以稻田湿地为主,占比达42.90% (图1a)。基于此,本文将作物湿地分为两类:一类是用于粮食生产的稻田湿地,另一类是种植蔬菜或能源作物的其他类型湿地。稻田湿地由水稻、土壤、微生物和水体构成,占全球湿地总面积的18%,是当前规模最大的人工湿地形式^[31]。近年来,种植蔬菜的作物湿地研究逐渐增多。例如,埃塞俄比亚,利用湿地开展城市农业,不仅改善了环境,还为居民提供了经济收益,种植作物包括玉米、土豆、胡萝卜、番茄等^[32]。此外,其他作物湿地植物如番茄、水菠菜、莴苣和

表1 作物湿地的特征及运行效果
Tab. 1 Characteristics and operational effects of crop wetlands

污水类型 Sewage type	湿地类型 Wetland type	湿地作物 Wetland crop	填料 Substrate	进水方式 WFP	水力停留时间 HRT (d)	水力负荷 HLR [m ³ /(m ² ·d)]	湿地面积 Wetland area (m ²)	作物产量 Crop yield (kg/ha)	进水水质 Influent quality (mg/L) TN TP	去除率 Removal rate (mg/L) TN TP	参考文献 Reference
农村生活 污水	表面流	水稻	土壤	间歇流			20	9000	8.45	69.30	[8]
							20	8500	2.30	62.90	
							20	8300	4.50	66.00	
受污染 河水	表面流	饲料水稻	石头、沙子、粉沙、黏土	连续流	0.28	0.20	30		2.53	39.92	[9]
污水厂 尾水	表面流	水稻	土壤	间歇流					13.45	0.72 55.63 86.98	[10]
农业废水	表面流	黑藻、茭白、荷花、菱角	土壤	间歇流	7—14		2500		4.50	0.13 31.11 22.20	[11]
农村生活 污水	表面流	水稻	土壤	间歇流			20	8648	0.41	65.40	[12]
				间歇流			20	8353	0.21	60.30	
				间歇流			20	9324	0.59	71.40	
市政污水	表面流	水稻	土壤	间歇流	25	0.03	1.50	4900	15	2 64.00 40.00	[13]
						0.02	1.50	4700	17.20	3.40 82.60 95.28	
农村生活 污水	水平流	香蒲、芦竹、滨海藜	砾石、沙子	连续流	8.00	0.04	5600		22.40	1.70 57.30 76.30	[14]
农村生活 污水	表面流	水稻	土壤	间歇流			20			30.20 65.70	[15]
							20			27.50 71.40	
							20			32.70 60.30	
市政污水	表面流	野茭白	土壤	连续流	2—5	0.04	500		20	1.95 48.50 51.30	[16]
市政污水	表面流	野生稻	土壤						1.95	58.10 64.50	[17]
受污染河 水	表面流	水稻、荷花、金鱼藻	土壤	连续流	2.00	0.09	1900000	521.42	0.50	45.61	[18]
农业废水	表面流	水稻	土壤	间歇流	0.42	0.67	312	9740	1.90	0.17 44.90 43.00	[19]
农业废水	表面流	海水稻	土壤	间歇流	0.83		0.51		0.76	91.00	[20]
农村生活 污水	表面流	水稻	土壤	间歇流	25	0.02	250	8085	2.10	0.41	[21]

续表 1

污水类型 Sewage type	湿地类型 Wetland type	湿地作物 Wetland crop	填料 Substrate	进水方式 WFP	水力停留时间 HRT (d)	水力负荷 HLR [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]	湿地面积 Wetland area (m^2)	作物产量 Crop yield (kg/ha)	进水水质		去除率		参考文献 Reference
									Influent quality (mg/L)		Removal rate (mg/L)		
									TN	TP	TN	TP	
农村生活污水	水平流	番茄	砾石、沙子	连续流	1.80	0.22	6.80	7300	6.70		10.00		[22]
市政污水	水平流	甘蔗	砖块碎片	连续流			0.99	107000	30	10.6	60.00	77.00	[23]
		甘蔗	碎石灰石	连续流			0.99	67000	30	10.6	58.00	68.00	
市政污水	水平流	甘蔗	建筑骨料、砖块、椰糠	间歇流	2.00	0.05	0.56		20.69		79.93		[24]
市政污水	水平流	芥菜	砾石、陶粒、黏土	连续流	1.25	0.20	0.75		45	2.03	76.53	79.89	[25]
		芹菜	砾石、陶粒、黏土	连续流	1.25	0.20	0.75		40.35	2.03	71.73	71.95	
		水芹	砾石、陶粒、黏土	连续流	1.25	0.20	0.75		43.91	2.03	73.41	80.95	
污水厂尾水	浮岛	韭葱	砾石、陶粒	连续流	1.25	0.20	0.75		30.10	2.86	47.89		[26]
	水平流	茄子	砾石、陶粒	连续流	1.25	0.20	0.75		30.10	2.86	21.47		
	浮岛	蕹菜	砾石、陶粒	连续流	1.25	0.20	0.75		30.10	2.86	35.38		
	水平流	辣椒	砾石、陶粒	连续流	1.25	0.20	0.75		30.10	2.86			
市政污水	浮岛、水平流	黄秋葵	砾石、陶粒	连续流	1.25	0.20	1.50		28.12	2.27	45.10	68.50	[27]
	浮岛、水平流	茄子	砾石、陶粒	连续流	1.25	0.20	1.50		28.12	2.27	33.60	53.60	
	浮岛、水平流	辣椒	砾石、陶粒	连续流	1.25	0.20	1.50		28.12	2.27	36.30	59.80	
市政污水	水平流、垂直流	黑麦草	砾石	间歇流	3	0.03	8.48		8		25.80		[28]
		冬小麦	砾石	间歇流	3	0.05	8.48		4		37.90		
农村生活污水	水平流	蕹菜	砾石	连续流	3.25	0.30	1.88		14.90	1.10	76.60	78.90	[29]
农业废水	表面流	水稻	土壤	间歇流			8100						[30]

注: TN指污水中总氮浓度; TP指污水中总磷浓度; WFP指进水方式; HRT指水力停留时间; HLR指水力负荷; 下同

Note: TN refers to the total nitrogen concentration in sewage; TP refers to the total phosphorus; WFP refers to Water flow pattern; HRT refers to hydraulic retention time; HLR refers to the hydraulic loading rate; the same applies below

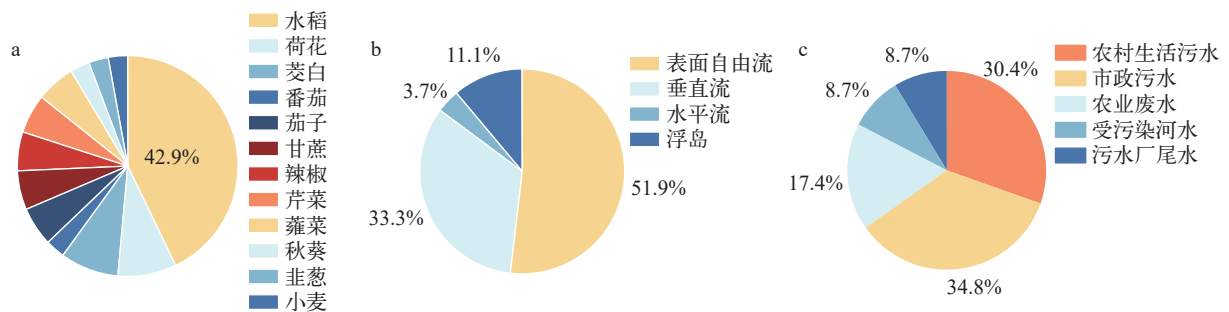


图1 作物湿地

Fig. 1 Crop wetlands

a. 植物类型; b. 湿地类型; c. 水质类型

a. Plant/crop types; b. Types of wetlands; c. Type of water in crop wetlands

辣椒等也被广泛研究。

传统人工湿地植物主要包括香蒲、芦苇、菖蒲和美人蕉等, 其具有较强的耐水性和抗逆性, 主要用于水质净化和生态修复^[32, 33]。相比之下, 作物

湿地植物如水稻、荷花、茭白、芹菜等, 除了适应湿地环境, 还具备显著的食用或经济价值^[11, 34]。传统湿地植物主要侧重于维持水质和生态平衡, 而作物湿地植物则兼具提供作物和经济收益的功能。

作物湿地植物体现了多功能湿地管理的特点,兼具生态与经济效益。

1.2 湿地类型

作物湿地主要采用表面自由流(51.90%)、水平流(33.30%)和浮岛(11.10%)的结构设计,而较少使用垂直流(3.70%;图1b),这是因为前者更适合作物的生长需求和系统功能的综合实现。表面流和水平流提供了稳定的水层和缓慢的流动环境^[35,36],作物根系可以充分接触水体中的水分和养分,适合如水稻、莲藕等湿生或水生植物的生长^[37,38]。浮岛则通过植物根系悬浮于水中直接吸收养分,避免了基质对根系扩展的限制,特别适合种植水生蔬菜或观赏植物^[39,40]。这些设计不仅能维持适宜的水文条件,还利于作物的长时间种植和稳定产出。而垂直流的水流以垂直方向快速渗透,导致水分和养分在系统中的停留时间较短,不利于大多数农作物根系的持续生长和养分吸收^[41,42]。此外,表面流、水平流和浮岛的操作和维护更为简便,便于种植、管理和收获经济作物,且灵活性更高,能够适应多样化的生产需求。相比之下,垂直流的复杂布水系统和以高效污染物去除为核心的设计目标,限制了其在作物湿地中的应用^[43]。因此,表面流、水平流和浮岛设计在兼顾生态功能和经济效益方面更具优势,成为作物湿地的首选形式。

1.3 适用水质

作物湿地可用于处理农村废水、生活污水、农业废水、受污染河水和污水厂尾水(图1c),并不合适工业废水。作物湿地主要适用于低浓度到中浓度的污水处理(图2),稻田湿地和其他作物湿地处理的TN、TP存在显著性差异($P<0.05$)。稻田湿地处理的污水中,TN浓度为2—20 mg/L(中位数5 mg/L),TP浓度为0—4 mg/L(中位数1.50 mg/L);而其他类型作物湿地处理的污水中,TN浓度为4—46 mg/L(中位数30 mg/L),TP浓度为1—11 mg/L(中位数3 mg/L)。(根据中国《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)及相关参考,低浓度污水 $\text{TN}\leq 20\text{ mg/L}$, $\text{TP}\leq 1\text{ mg/L}$;中浓度污水 $20\text{ mg/L}<\text{TN}\leq 100\text{ mg/L}$, $1\text{ mg/L}<\text{TP}\leq 10\text{ mg/L}$ ^[44])。与其他作物相比,稻田湿地常用于低浓度污水处理(图2),主要是因为作物的耐污能力和对污染物的适应性不同。水稻作为主要粮食作物,对水质要求较高,高浓度污水中的污染物可能会对其生长产生毒害作用,影响产量和品质,因此更适合用于处理经过初步处理或浓度较低的污水^[10,45]。而蔬菜类湿地多种植如水芹、蕹菜等耐污性强的作物,它们对污水中污染物的耐受力较高,能够适应并利用中高浓度

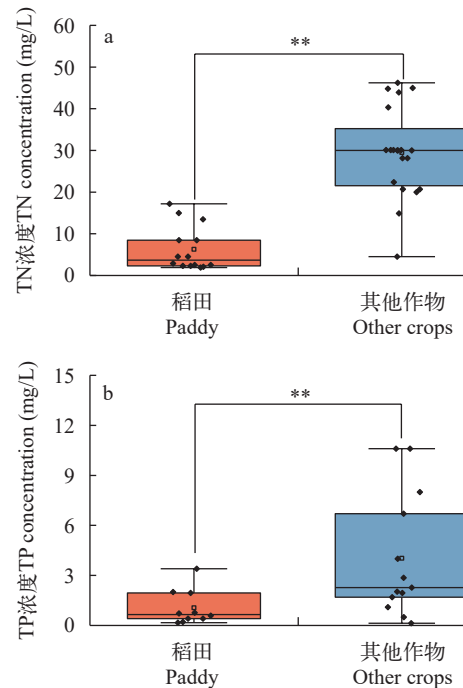


图2 稻田和其他作物湿地处理污水浓度

Fig. 2 Concentration of treated wastewater in paddy and other crop wetlands

a. 总氮total nitrogen; b. 总磷total phosphorus (** $P<0.01$)

污水中的营养成分如氮、磷^[26,46]。

2 作物湿地的功能

2.1 水质净化

污水处理原理 作物湿地去除污染物的主要原理是生物、物理和化学过程的综合作用^[47]。尽管管理措施能够增强植物对氮的直接吸收^[48],但氮的去除仍以微生物过程为主^[49]。磷的去除则依赖于植物吸收、土壤吸附和微生物活动的协同作用,最终通过植物收割实现有效去除^[50]。植物根系为根际微生物群落提供适宜的栖息环境,这些微生物通过促进养分释放和调控细菌活性显著提升净化效率^[51]。此外,湿地中的生物膜在养分同化、固氮以及磷活化过程中也起到了重要作用^[52]。这些多重机制共同保障了作物湿地在污染物削减与生态修复中的高效表现。

处理污水效率及影响因素 作物湿地和传统人工湿地在氮磷污染物的去除方面均具有显著的净化能力,但其机制和效率存在一定差异。稻田和其他作物湿地在TN、TP去除上无显著性差异($P>0.05$;图3)。稻田湿地TN和TP去除率的四分位距(IQR)相对较小,这一数据特征意味着其去除效率的波动幅度较为有限,体现出较高的稳定性。与之形成对比的是,其他作物湿地的去除率波动较为

显著, 离散程度较高。这一现象可归因于其他作物湿地类别涵盖了更为丰富多样的作物类型, 不同作物种类对湿地运行效能的影响存在较大差异, 进而导致该类别湿地在 TN 和 TP 去除率上呈现出较大的离散性。整体而言, 作物湿地在 TN 去除与传统表面自由流湿地(40%—60%)相当, 低于水平潜流湿地(60%—80%)的去除效率, TP 去除低于潜流湿地(70%—90%)^[53, 54]。此外, 作物湿地在实现污染物去除的同时, 还能兼顾生态功能与经济效益, 为水质改善提供了更具综合优势的选择。

不同作物类型对污染物去除效率存在影响, 与种植辣椒相比, 种植蔬菜和茄子对氨氮的去除率更高, 韭葱对硝态氮的去除率更高^[26]。与芦苇(41000 kg/ha)相比, 茭白作为湿地植物能够更好地吸收氮磷, 总生物量达到74000 kg/ha^[55]。同时, 植物的生长状况直接受到季节性变化的影响。随着季节的更替, 温度、光照和降雨量的变化会影响植物的生理活动和生长速度, 从而影响其对污染物的吸收能力^[56, 57]。在夏季水稻生长期, 稻田湿地对养殖污水的处理效果与非生长季节冬季(氨氮降低51.50%、亚硝酸盐氮降低40%)相比下降^[20], 在夏季降雨的影响下, 高降水量会导致氮的去除效率降低^[14]。

水力负荷和水力停留时间是影响污水处理效率的重要参数, 呈现出灌溉方式、布水方式及运行

水位的综合影响。稻田湿地在HLR为 $0.02 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时, 处理效果最好, 随着水力负荷的不断增大, 处理效果不会增强, 同时, 水力停留时长达到25d时达到了最好的处理效果^[13], 较低的水力负荷率, 较长的水力停留时间有利于提高污染物的去除效率。在不同布水设计中, 漫流式布水对总氮去除效果最好, 沟灌渗滤对总磷的去除效果最好^[21]。合理的运行水位调控可以确保湿地中植物根系的氧气供应, 维持最佳的微生物活动, 从而提高污染物的降解和吸收效率。

填料是影响人工湿地处理效果的重要因素, 其选择直接关系到污染物去除的效率^[58]。填料不仅为植物和微生物提供了附着生长的基质, 还能够通过物理吸附、化学沉淀等方式直接参与污染物的去除过程^[59]。在作物湿地中, 可以结合当地的生活和生产资源, 选择适宜的填料。相比于碎石, 建筑废料碎砖在人工湿地中对总磷和总氮的平均去除效率分别达到了77%和60%, 在碎砖(107000 kg/ha)填充的湿地甘蔗的生物量产量比碎石(67000 kg/ha)高^[23], 同时可以考虑在作物湿地中加入农业废弃物椰糠等有机质, 有助于微生物的生长和活性^[24]。

2.2 营养元素回收利用

作物湿地对氮磷的利用效率显著高于传统人工湿地。污水中的氮主要以氨氮(NH_4^+)和硝氮(NO_3^-)形式存在, 磷则以无机磷(PO_4^{3-})为主, 这些化合物是植物生长的必需养分^[60-61]。传统人工湿地植物尽管能够通过根系吸收水中的氮磷元素, 但其利用率通常较低, 仅为5%—10%^[62-63]。相比之下, 作物湿地种植目标明确, 运行管理优化, 多选择高经济价值作物(如水稻、蔬菜或饲料草), 这些作物具有更强的生长需求和更高的养分吸收能力, 从而显著提高氮磷利用效率。

在作物湿地中, 作物能够有效吸收污水中的氮磷等营养元素(表2)。在水稻种植中, 在相同肥力条件下, 使用农村生活污水灌溉可显著提高作物产量, 尤其是黑水和灰水灌溉, 能够有效促进作物生长, 并有助于减少化肥的使用^[8, 12]。在不施加化肥的条件下, 农村生活污水能够完全满足番茄生长所需的营养需求, 且番茄的产量(7300 kg/ha)显著高于哥伦比亚传统土壤种植的产量(3700 kg/ha)^[22]。在不施加化肥的条件下, 市政污水中的养分可满足作物的生长需求。泰国的研究表明, 市政污水灌溉水稻的产量与传统灌溉方式差异不显著, 其中水力停留时间为25d的市政污水灌溉水稻的产量(4700 kg/ha)仅低于传统稻田的产量(5000 kg/ha)约6%^[13]。此外, 在甘蔗种植过程中, 市政污水中的养分能够充分满

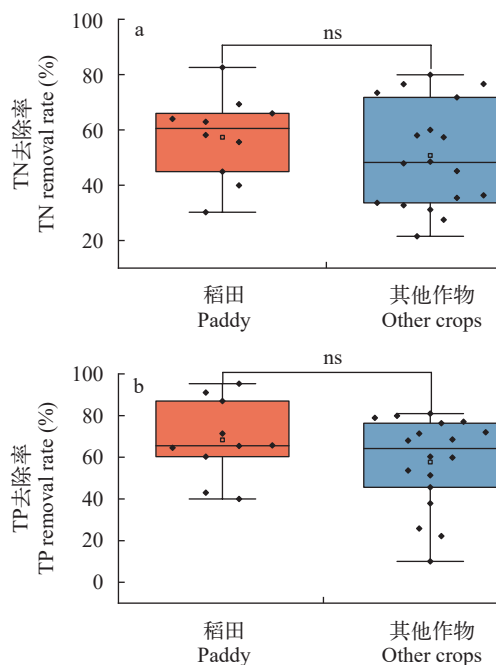


图3 稻田和其他作物湿地污水去除效率

Fig. 3 Wastewater removal efficiency in paddy and other crop wetlands

a. 总氮total nitrogen; b. 总磷total phosphorus

足甘蔗的生长需求,在人工湿地中种植甘蔗时,其产量(67000和107000 kg/ha)接近巴西和美国传统种植水平(65000—226000 kg/ha)^[23]。在人工湿地系统中种植茭白的总生物量达到74000 kg/ha,其氮和磷积累量分别为1708和107.60 kg/ha,而芦苇的对应生物量仅约41000 kg/ha,氮积累量为1197 kg/ha,磷积累为97.40 kg/ha^[55]。作物通过根系吸收氮磷,将这

表 2 作物湿地作物产量

Tab. 2 Crop wetlands crop yield

污水类型 Sewage type	湿地类型 Wetland type	湿地作物 Wetland crop	湿地面积 Wetland area (m ²)	作物产量 Crop yield (kg/ha)	参考文献 Reference
农村生活污水	黑水 灰水 生活废水 地表水	表面自由流 水稻 水稻	水稻 20 20	20 9000 8500 8300 8100	[8]
农村生活污水	黑水 灰水 生活废水 地表水	表面自由流 水稻 水稻	水稻 20 20	20 8353.30 9324.30 8647.90 8121.90	[12]
市政污水	表面自由流	水稻	1.50	4900	[13]
受污染河水	表面自由流	水稻	1900000	521.42	[18]
农业废水	表面自由流	水稻	312	9740	[19]
农村生活废水	表面自由流	水稻	250	8050	[21]
农村生活污水	潜流	番茄	6.80	7300	[22]
市政污水	水平流	甘蔗 甘蔗	0.99 0.99	107000 67000	[23]

些营养元素转化为生物质并持续通过收割去除积累的污染物^[64]。这一过程不仅提高了湿地对氮磷的去除效率,还改善了湿地基质的稳定性和整体环境质量(图 4)。因此,作物湿地在实现污染物净化的同时兼具经济效益,是传统湿地的一种重要升级模式。

同时,作物湿地的运行管理方式高度依赖于科学设计和精细化管理。通过选择适宜的作物类型(水稻、番茄、甘蔗),制定合理的种植密度^[65]和轮作模式^[66],水力负荷根据季节变化进行调整,可以最大化植被的生物量积累,以提高营养元素的利用效率。因此,作物湿地不仅在环境保护方面具备更优的处理效果,还兼具经济效益,有助于实现可持续发展的目标。

作物对氮磷的有效吸收能够降低基质的饱和和风险,使得湿地基质的负荷减轻,延长湿地基质的使用寿命,减少基质更换的频率,从而节省了运营和维护成本^[67]。作物在吸收氮磷的同时进行光合作用,固定大气中的二氧化碳,这一过程不仅减少了氮循环中对微生物代谢的依赖,还能够降低温室气体的排放。特别是通过减少反硝化作用的强度,可以有效降低一氧化二氮(N₂O)等温室气体的生成,从而缓解湿地系统的温室效应^[68]。作物吸收氮磷的增强还带来了污泥量的减少。由于污泥的形成主要源自微生物对有机物的分解,作物吸收作用的增加能够减少湿地内污泥的生成,减轻污泥在基质中的堆积压力^[69]。

2.3 综合农业效能

作物湿地与其他农业生产活动的结合,能够形成多功能的综合农业模式。以稻鱼共作、稻鸭共

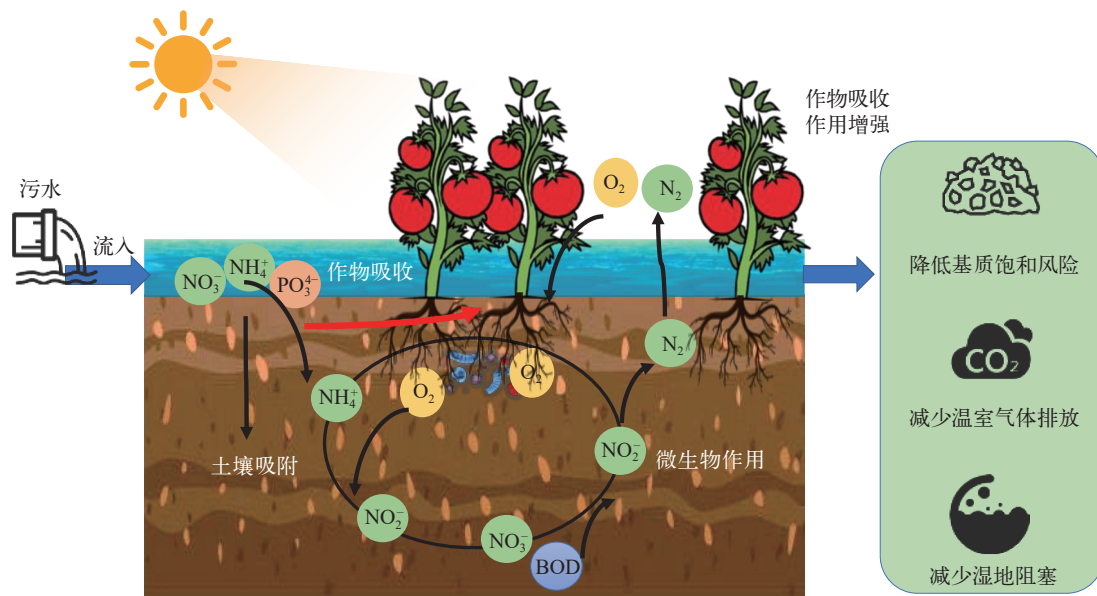


图 4 作物湿地氮磷去除机理及对湿地的影响

Fig. 4 Nitrogen and phosphorus removal mechanism of crop wetland and its impact on wetland

作为代表的模式, 通过在稻田中饲养鱼类、鸭类等, 不仅增强稻田的生态功能, 还实现农业生产的多样化和经济效益的提升^[70-71]。与传统水稻种植模式(10000 元/hm²)相比, 综合养殖模式的综合产值如稻-鸭(27750 元/hm²)、稻-鱼(40000 元/hm²)、稻-虾(42000 元/hm²)^[72]、稻-小龙虾(30000 元/hm²)、稻-蟹(45000 元/hm²)^[73]和稻-鳖(53920 元/hm²)^[74]显著提高了经济效益。目前, 一种更省种、省工的综合生产模式正在推广, 在稻-再生稻-鸭^[75]系统中, 综合产值为43602 元/hm², 并且氮肥使用量相比传统水稻种植减少了20%—30%。与此相比, 稻-再生稻-小龙虾^[76]系统的综合产值更高, 达到102754 元/hm², 同时化肥使用量较传统水稻种植减少了37.30%。这些模式利用鱼类和鸭类控制杂草和害虫, 减少农药使用, 同时增加稻田的产出, 鱼类和鸭类的排泄物则为稻田提供有机肥, 促进水稻生长, 形成自然的营养循环^[77-78]。

此外, 作物湿地的净化与出水功能可以与其他水利设施和农业用地改造相结合, 进一步提升农业的水资源管理效率和可持续性。通过将作物湿地与灌溉塘、排水沟、蓄水池等构筑物联合使用, 能够形成综合的水资源管理系统^[79-80]。在这一系统中, 作物湿地处理后的出水可以储存在蓄水池中, 或通过排水沟回流至灌溉塘, 为干旱季节或用水高峰期提供稳定的灌溉水源, 从而实现资源的高效循环利用。

3 风险与挑战

作物湿地废水处理中存在一些不可忽视的问题和挑战。进水污水中存在的致病微生物如大肠杆菌会对作物生长造成危害^[81]。另一方面, 湿地本身用于处理污水的微生物群落^[82]也可能带来风险, 尤其是当这些微生物未经有效控制和管理时, 可能会对环境 and 人类健康产生不利影响。因此, 如何控制和降低微生物污染成为作物湿地中食品安全的重要问题。为此, 选择适宜的作物种类、优化污水处理工艺和严格监控微生物含量是确保食品安全的关键措施。在作物湿地串联紫外线消毒技术^[83-84]、小规模太阳能驱动在现场氯生成系统^[85]或低成本的砂滤器^[86]能够显著降低水中的病原微生物数量, 有效减少其对作物生长及食品安全的潜在威胁。

随着新污染物(如全氟和多氟烷基物质等持久性污染物)^[87]对环境和公共健康的影响日益显著, 深入理解这些污染物在湿地植物中的积累、转化及其对作物生长的影响, 变得尤为重要。与普通人工湿地致力于强化植物吸收作用, 以实现对新污染

物的高效去除不同, 作物湿地则需采取弱化这一过程的策略。普通人工湿地依靠增强植物对新污染物的吸收能力, 将污染物富集于植物体内, 随后通过植物收割及焚烧等后续处理手段, 完成对污染物的去除。而作物湿地因其产出的食物作物会直接进入人类食物链, 一旦新污染物在植物中大量积累, 将对食品安全构成严重威胁。所以, 作物湿地需弱化新污染物进入植物的过程, 从而切实降低食品安全风险, 保障人类健康。目前已有研究发现通过添加富铁材料为基质填料、调控人工湿地的水位等可诱导人工湿地植物根部形成铁膜, 有效阻止新污染物进入植物^[88]。作物湿地还需关注重金属的潜在风险。重金属污染不仅可能影响作物的生长发育, 还可能通过食物链累积, 对人体健康造成长期危害。针对这一问题, 可采用调控基质pH、添加稳定化材料(如生物炭、铁氧化物)及优化水力条件等方法^[89], 以降低重金属的生物可利用性, 从而减少其向作物的迁移累积, 提高食品安全性。

4 结论

作物湿地是一种高效、低成本的污水处理技术, 广泛应用于农村废水、农业废水、市政污水、污染河水及污水厂尾水的净化处理中。作为作物湿地的主要形式, 稻田湿地占比42.60%, 其优势在于适合处理低污染污水, 且以其简便且低成本的维护方式, 特别适合在农业和农村地区进行推广。作物湿地主要采用表面流(51.90%)、水平流(33.30%)和浮岛(11.10%)等设计形式, 而垂直流的应用较少(3.70%)。作物湿地不仅在水质净化和养分回收方面表现出色, 还具备多重功能, 如促进综合农业。与传统湿地相比, 作物湿地在养分回收利用和农业综合发展方面具有显著优势。未来的研究应重点关注优化作物湿地的设计与管理, 尤其是在防治病原微生物、新污染物和重金属等潜在风险, 以保障食品安全和环境健康。通过进一步提升作物湿地的净化效率和生态功能, 可以更好地实现农业与生态系统的协调发展。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Wu H, Wang R, Yan P, et al. Constructed wetlands for pollution control [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(4): 218-234.
- [2] Katagi S, Chatterjee S, Vairale M G, et al. Constructed wetland, an eco-technology for wastewater treatment: a review on types of wastewater treated and components of the technology (macrophyte, biofilm and substrate) [J].

- Journal of Environmental Management*, 2021(283): 111986.
- [3] Su Y, He S, Wang K, *et al.* Quantifying the sustainability of three types of agricultural production in China: an emergy analysis with the integration of environmental pollution [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020(252): 119650.
 - [4] Fu H, Tan P, Wang R, *et al.* Advances in organophosphorus pesticides pollution: Current status and challenges in ecotoxicological, sustainable agriculture, and degradation strategies [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022 (424): 127494.
 - [5] Nelson M, Wolverton B C. Plants+soil/wetland microbes: Food crop systems that also clean air and water [J]. *Advances in Space Research*, 2011, **47**(4): 582-590.
 - [6] Kuntashula E, Sileshi G, Mafongoya P L, *et al.* Farmer participatory evaluation of the potential for organic vegetable production in the wetlands of Zambia [J]. *Outlook on Agriculture*, 2006, **35**(4): 299-305.
 - [7] Freeman B W J, Evans C D, Musarika S, *et al.* Responsible agriculture must adapt to the wetland character of mid-latitude peatlands [J]. *Global Change Biology*, 2022, **28**(12): 3795-3811.
 - [8] Li S, Li H, Liang X, *et al.* Rural wastewater irrigation and nitrogen removal by the paddy wetland system in the Tai Lake region of China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2009, **9**(5): 433-442.
 - [9] Zhou S, Hosomi M. Nitrogen transformations and balance in a constructed wetland for nutrient-polluted river water treatment using forage rice in Japan [J]. *Ecological Engineering*, 2008, **32**(2): 147-155.
 - [10] Ma R, Duan J, Xue L, *et al.* Treatment of nitrogen and phosphorus from sewage tailwater in paddy rice wetlands: concept and environmental benefits [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024, **196**(2): 174.
 - [11] Xiong Y, Peng S, Luo Y, *et al.* A paddy eco-ditch and wetland system to reduce non-point source pollution from rice-based production system while maintaining water use efficiency [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, **22**(6): 4406-4417.
 - [12] Li S, Li H, Liang X Q, *et al.* Phosphorus removal of rural wastewater by the paddy-rice-wetland system in Tai Lake Basin [J]. *Journal of hazardous materials*, 2009, **171**(1/2/3): 301-308.
 - [13] Kantawanichkul S, Duangjaiak W. Domestic wastewater treatment by a constructed wetland system planted with rice [J]. *Water Science and Technology*, 2011, **64**(12): 2376-2380.
 - [14] Sun H, Zhang H, Yu Z, *et al.* Combination system of full-scale constructed wetlands and wetland paddy fields to remove nitrogen and phosphorus from rural unregulated non-point sources [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2013, **35**(6): 801-809.
 - [15] Li S, Liu S H, Chen Y X. Experiment on the treatment of the rural wastewater by the paddy wetland system [J]. *Advanced Materials Research*, 2012(347): 2103-2106.
 - [16] Abe K, Komada M, Ookuma A, *et al.* Purification performance of a shallow free-water-surface constructed wetland receiving secondary effluent for about 5 years [J]. *Ecological Engineering*, 2014(69): 126-133.
 - [17] Kogi J, Miyamoto M, Bolthouse J, *et al.* The potential for abandoned paddy fields to reduce pollution loads from households in suburban Tokyo [J]. *Water*, 2010, **2**(3): 649-667.
 - [18] Le W C, Zhang Y, Liu Q, *et al.* Design of paddy wetland and its operation performance in the Yangtze River Basin [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, **40**(5): 111-115. [乐文彩, 张玉, 刘青, 等. 长江流域稻田湿地设计及运行效果 [J]. 中国给水排水, 2024, **40**(5): 111-115.]
 - [19] Zou H S, Fu M, Xiao M D, *et al.* Study on ecological purification system of tidal-flow paddy wetland based on multifunctional coupling [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2024(1): 58-67. [邹宏硕, 傅敏, 肖梦蝶, 等. 基于多功能耦合的潮汐流稻田湿地生态净化系统研究 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2024(1): 58-67.]
 - [20] Zhang X X, Li T, Li S W, *et al.* Purification effect of searice paddy field on brackish water environment of shrimp culture [J]. *South China Fisheries Science*, 2023, **19**(3): 19-28. [张新新, 李婷, 李少文, 等. 海水稻田湿地对半咸水对虾养殖池塘水环境的净化作用研究 [J]. 南方水产科学, 2023, **19**(3): 19-28.]
 - [21] Xue L H, Yang L Z. Purification of water with low concentrations of N and P in paddy wetlands in Taihu Lake Region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(1): 117-124. [薛利红, 杨林章. 太湖流域稻田湿地对低污染水中氮磷的净化效果 [J]. 环境科学研究, 2015, **28**(1): 117-124.]
 - [22] Caselles Osorio A, Mendoza P G, *et al.* Tomato (*Lycopersicon esculentum*) production in sub surface flow constructed wetlands for domestic wastewater treatment in rural a Colombian community [J]. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 2018, **19**(4): 1-10.
 - [23] Mateus D, Vaz M, Capela I, *et al.* The potential growth of sugarcane in constructed wetlands designed for tertiary treatment of wastewater [J]. *Water*, 2016, **8**(3): 93.
 - [24] Boopathi N, Kadarkarai R. A laboratory-scale study of residential greywater treatment with sugarcane in a constructed wetland [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, **29**(40): 61178-61186.
 - [25] Hussain I, Lu X, Hussain J, *et al.* Nutrients removal efficiency assessment of constructed wetland for the rural domestic wastewater growing distinct species of vegetation [J]. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 2018, **8**(588): 2161-0525.1000588.

- [26] Abbasi H, Vasileva V, Lu X. The influence of the ratio of nitrate to ammonium nitrogen on nitrogen removal in the economical growth of vegetation in hybrid constructed wetlands [J]. *Environments*, 2017, 4(1): 24.
- [27] Abbasi H N, Ahmad W, Ali Shahzad K, *et al.* Evaluating the potential of *Abelmoschus esculentus*, *Solanum melongena*, and *Capsicum annuum* spp. for nutrient and microbial reduction from wastewater in hybrid constructed wetland [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024, 196(3): 293.
- [28] Ren Y X, Yang C H, Sun J F, *et al.* Effects on the wastewater treatment with *Triticum aestivum* L. and *Lolium perenne* L. as cultivated plant in hydroponic ditch and hybrid constructed wetland in cold season [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology* (Natural Science Edition), 2012, 44(5): 714-719. [任勇翔, 杨春辉, 孙军峰, 等. 冬小麦和黑麦草作为寒冷季节人工湿地栽培作物处理城市污水效果研究 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(5): 714-719.]
- [29] Gong L, Chen G, Li J, *et al.* Utilization of rural domestic sewage tailwaters by *Ipomoea aquatica* in different hydroponic vegetable and constructed wetland systems [J]. *Water Science and Technology*, 2020, 82(2): 386-400.
- [30] Guo F M, Sun Q, Wang Y J. Case study of "two dams and three ponds+paddy field" aquaculture tail water treatment model [J]. *Scientific Fish Farming*, 2023(2): 24-25. [郭凤鸣, 孙潜, 王一娟. "二坝三池+稻田" 养殖尾水处理模式案例 [J]. 科学养鱼, 2023(2): 24-25.]
- [31] Yoon C G. Wise use of paddy rice fields to partially compensate for the loss of natural wetlands [J]. *Paddy and Water Environment*, 2009, 7(4): 357-366.
- [32] Feyissa M E, Cao J, Tolera H. Integrated remote sensing-GIS analysis of urban wetland potential for crop farming: a case study of Nekemte district, western Ethiopia [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(5): 153.
- [33] Kulshreshtha N M, Verma V, Soti A, *et al.* Exploring the contribution of plant species in the performance of constructed wetlands for domestic wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2022(18): 101038.
- [34] Kuntashula E, Mafongoya P L, Sileshi G, *et al.* Potential of biomass transfer technologies in sustaining vegetable production in the wetlands (DAMBOS) of eastern Zambia [J]. *Experimental Agriculture*, 2004, 40(1): 37-51.
- [35] Boog J, Nivala J, Kalbacher T, *et al.* Do wastewater pollutants impact oxygen transfer in aerated horizontal flow wetlands [J]? *Chemical Engineering Journal*, 2020(383): 123173.
- [36] Kadlec R H, Bastiaens W, Urban D T. Hydrological Design of Free Water Surface Treatment Wetlands [M]. Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Boca Raton: CRC Press, 2020: 77-86.
- [37] Lu H F, Tan Y W, Zhang W S, *et al.* Integrated emergy and economic evaluation of Lotus-root production systems on reclaimed wetlands surrounding the Pearl River Estuary, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017(158): 367-379.
- [38] Dierberg F E, DeBusk T A, Jackson S D, *et al.* Submerged aquatic vegetation-based treatment wetlands for removing phosphorus from agricultural runoff: response to hydraulic and nutrient loading [J]. *Water Research*, 2002, 36(6): 1409-1422.
- [39] Yang S, Xu J, Zhang J, *et al.* Reduction of non-point source pollution from paddy fields through controlled drainage in an aquatic vegetable wetland-ecological ditch system [J]. *Irrigation and Drainage*, 2016, 65(5): 734-740.
- [40] Jain A, Roshnibala S, Kanjilal P, *et al.* Aquatic/semi-aquatic plants used in herbal remedies in the wetlands of Manipur, Northeastern India [J]. *The Indian journal of traditional knowledge*, 2007, 6(2): 346-351.
- [41] Vymazal J. Constructed wetlands for wastewater treatment [J]. *Water*, 2010, 2(3): 530-549.
- [42] Brix H, Arias C A. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines [J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(5): 491-500.
- [43] Soundaranayaki K, Gandhimathi R. Performance of various media in vertical flow constructed wetland for the treatment of domestic wastewater [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2019(146): 57-67.
- [44] State Environmental Protection Administration. Urban Sewage Treatment Plant Pollutant Discharge Standard [M]. Aqsiq. 2002: 13P.; A4. [国家环境保护总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准 [M]. 国家质检总局. 2002: 13P.; A4.]
- [45] Yin A, Duan J, Xue L, *et al.* High yield and mitigation of N-loss from paddy fields obtained by irrigation using optimized application of sewage tail water [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020(304): 107137.
- [46] Ikeda H, Osawa T. Comparison of adaptability to nitrogen source among vegetable crops II. Growth response and accumulation of ammonium-and nitrate-nitrogen of leaf vegetables cultured in nutrient solution containing nitrate, ammonium, and nitrite as nitrogen sources [J]. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 1980, 48(4): 435-442.
- [47] Lu S Y, Jin X C, Yu G. Phosphorus removal mechanism of constructed wetland [J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2): 391-396. [卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的磷去除机理 [J]. 生态环境, 2006, 15(2): 391-396.]
- [48] Lin X, Eguchi S, Maeda S, *et al.* Combined effects of oxygen and temperature on nitrogen removal in a nitrate-rich ex-paddy wetland [J]. *Science of the Total Environment*, 2021(779): 146254.
- [49] Sagehashi M, Zhou S, Naruse T, *et al.* Nitrogen dynamics and biomass production in a vertical flow

- constructed wetland cultivated with forage rice and their mathematical modeling [J]. *Journal of Water and Environment Technology*, 2009, 7(4): 251-266.
- [50] Guo H R, Zhao L C, Dou C Y. Mechanisms of nitrogen and phosphorus removal in paddy wetland and its research progress [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(6): 23-26. [郭海瑞, 赵立纯, 窦超银. 稻田人工湿地氮磷去除机制及其研究进展 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(6): 23-26.]
- [51] Murase J, Asiloglu R. Protists: the hidden ecosystem players in a wetland rice field soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2024, 60(6): 773-787.
- [52] Wu Y, Liu J, Rene E R. Periphytic biofilms: a promising nutrient utilization regulator in wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2018(248): 44-48.
- [53] Parde D, Patwa A, Shukla A, *et al.* A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021(21): 101261.
- [54] Scholz M, Lee B H. Constructed wetlands: a review [J]. *International Journal of Environmental Studies*, 2005, 62(4): 421-447.
- [55] Tanner C C. Plants for constructed wetland treatment systems—a comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species [J]. *Ecological Engineering*, 1996, 7(1): 59-83.
- [56] Ruan W, Cai H, Xu X, *et al.* Efficiency and plant indication of nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands: a field-scale study in a frost-free area [J]. *Science of the Total Environment*, 2021(799): 149301.
- [57] Zhao Z, Song X, Xiao Y, *et al.* Influences of seasons, N/P ratios and chemical compounds on phosphorus removal performance in algal pond combined with constructed wetlands [J]. *Science of the Total Environment*, 2016(573): 906-914.
- [58] Yang C, Zhang X, Tang Y, *et al.* Selection and optimization of the substrate in constructed wetland: a review [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022(49): 103140.
- [59] Ji Z, Tang W, Pei Y. Constructed wetland substrates: a review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal [J]. *Chemosphere*, 2022(286): 131564.
- [60] Abdoli S, Asgari Lajayer B, Dehghanian Z, *et al.* A review of the efficiency of phosphorus removal and recovery from wastewater by physicochemical and biological processes: challenges and opportunities [J]. *Water*, 2024, 16(17): 2507.
- [61] Omar A, Almomani F, Qiblawey H, *et al.* Advances in nitrogen-rich wastewater treatment: a comprehensive review of modern technologies [J]. *Sustainability*, 2024, 16(5): 2112.
- [62] Shelef O, Gross A, Rachmilevitch S. Role of plants in a constructed wetland: current and new perspectives [J]. *Water*, 2013, 5(2): 405-419.
- [63] Stottmeister U, Wießner A, Kusch P, *et al.* Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment [J]. *Biotechnology Advances*, 2003, 22(1/2): 93-117.
- [64] Vymazal J. Removal of nutrients in constructed wetlands for wastewater treatment through plant harvesting—Biomass and load matter the most [J]. *Ecological Engineering*, 2020(155): 105962.
- [65] Zheng Y, Yang D, Dzakupasu M, *et al.* Effects of plants competition on critical bacteria selection and pollutants dynamics in a long-term polyculture constructed wetland [J]. *Bioresource Technology*, 2020(316): 123927.
- [66] Panneerselvam P, Senapati A, Chidambaranathan P, *et al.* Long-term impact of pulses crop rotation on soil fungal diversity in aerobic and wetland rice cultivation [J]. *Fungal Biology*, 2023, 127(6): 1053-1066.
- [67] Reddy L, Kumar D, Asolekar S R. Typologies for successful operation and maintenance of horizontal sub-surface flow constructed wetlands [J]. *Sciences*, 2014, 6(12): 157-164.
- [68] Stein L Y. The long-term relationship between microbial metabolism and greenhouse gases [J]. *Trends in Microbiology*, 2020, 28(6): 500-511.
- [69] Wang J, Chon K, Ren X, *et al.* Effects of beneficial microorganisms on nutrient removal and excess sludge production in an anaerobic-anoxic/oxic (A2O) process for municipal wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2019(281): 90-98.
- [70] Wang X C, Tian Z Y, Yang C Y, *et al.* Can the adoption of rice-aquaculture integrated cultivation mode improve farmers' benefits? A case study of rice and crayfish coculture pattern [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(10): 259-274. [汪熙琮, 田卓亚, 杨彩艳, 等. 采纳稻田综合种养模式能否提升农户效益?——以稻虾共作模式为例 [J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(10): 259-274.]
- [71] Natuhara Y. Ecosystem services by paddy fields as substitutes of natural wetlands in Japan [J]. *Ecological Engineering*, 2013(56): 97-106.
- [72] Yang D L, Hu Z Z, Yi Z W, *et al.* Analysis and suggestion on the development of comprehensive planting and breeding industry in paddy field in Taizhou City [J]. *China Rice*, 2020, 26(1): 108-110. [杨大柳, 胡中泽, 衣政伟, 等. 泰州市稻田综合种养产业发展分析及建议 [J]. 中国稻米, 2020, 26(1): 108-110.]
- [73] Yang Y, Dai L Y, Song C T. History, present situation and countermeasures of developing comprehensive planting and breeding of rice and fishery in Yandu District [J]. *Journal of Aquaculture*, 2020, 41(2): 69-70. [杨钰, 戴凌云, 宋长太. 盐都区发展稻渔综合种养的历史、现状与对策措施 [J]. 水产养殖, 2020, 41(2): 69-70.]

- [74] Li R, Yi S D, Zhao W L, *et al.* Analysis of rice yield, composition and economic benefit of “rice-ratooning rice-duck” paddy field comprehensive cultivation and planting mode of middle rice and ratooning rice in Jiangnan Plain [J]. *South-Central Agricultural Science and Technology*, 2024, **45**(12): 134-141. [李戎, 易苏丹, 赵文龙, 等. 江汉平原“稻-再生稻-鸭”稻田综合种养与中稻、再生稻种植模式的水稻产量、构成与经济效益分析 [J]. 中南农业科技, 2024, **45**(12): 134-141.]
- [75] Chen J, He J X, Huang L, *et al.* Analysis of economic benefit of rice-ratooning rice-crayfish integrated cultivation in paddy field [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2024, **30**(3): 139-144. [陈静, 何吉祥, 黄龙, 等. 稻—再生稻—小龙虾稻田综合种养经济效益分析 [J]. 安徽农学通报, 2024, **30**(3): 139-144.]
- [76] Zhang J, Hu L, Ren W, *et al.* Rice-soft shell turtle coculture effects on yield and its environment [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, (**224**): 116-122.
- [77] Huai Y, Wang Y J, Chen Y P, *et al.* Chemical fertilizer reduction analysis of rice-based co-culture system [J]. *China Rice*, 2018, **24**(5): 30-34. [怀燕, 王岳钧, 陈叶平, 等. 稻田综合种养模式的化肥减量效应分析 [J]. 中国稻米, 2018, **24**(5): 30-34.]
- [78] Kong Y. Control effect and mechanism of comprehensive planting and breeding model in rice field on rice diseases, pests and weeds [J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2019, **30**(4): 13-14. [孔勇. 稻田综合种养模式对水稻病虫害草害的控制作用及机理 [J]. 农村经济与科技, 2019, **30**(4): 13-14.]
- [79] Allred B J, Gamble D L, Clevenger W B, *et al.* Crop yield summary for three wetland reservoir subirrigation systems in northwest Ohio [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2014, **30**(6): 889-903.
- [80] Dong B, Mao Z, Brown L, *et al.* Irrigation ponds: Possibility and potentials for the treatment of drainage water from paddy fields in Zhanghe Irrigation System [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, **52**(11): 3320-3327.
- [81] Al-Bahry S N, Mahmoud I Y, Al-Musharafi S K, *et al.* Microbial and chemical pollution of water-wells relative to sewage effluents in Oman [J]. *Journal of Sustainability, Energy & the Environment*, 2014, **1**(1): 35-56.
- [82] Cao Q, Wang H, Chen X, *et al.* Composition and distribution of microbial communities in natural river wetlands and corresponding constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2017(98): 40-48.
- [83] Galvão A, Matos J, Silva M, *et al.* Constructed wetland performance and potential for microbial removal [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2009, **4**(1/2/3): 76-84.
- [84] Russo N, Marzo A, Randazzo C, *et al.* Constructed wetlands combined with disinfection systems for removal of urban wastewater contaminants [J]. *Science of the Total Environment*, 2019(656): 558-566.
- [85] Otter P, Hertel S, Ansari J, *et al.* Disinfection for decentralized wastewater reuse in rural areas through wetlands and solar driven onsite chlorination [J]. *Science of the Total Environment*, 2020(721): 137595.
- [86] Kaliakatsos A, Kalogerakis N, Manios T, *et al.* Efficiency of two constructed wetland systems for wastewater treatment: removal of bacterial indicators and enteric viruses [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2019, **94**(7): 2123-2130.
- [87] Wen M D, Chen W B, Gao Z H, *et al.* Technological progress in occurrence and end control of emerging contaminants in WWTP [J]. *Water Purification Technology*, 2022, **41**(5): 14-22. [温明铎, 陈文兵, 高自豪, 等. 污水处理厂新兴污染物赋存及末端控制技术进展 [J]. 净水技术, 2022, **41**(5): 14-22.]
- [88] Fan Y, Sun S, He S. Iron plaque formation and its effect on key elements cycling in constructed wetlands: Functions and outlooks [J]. *Water Research*, 2023(235): 119837.
- [89] Yu G, Wang G, Chi T, *et al.* Enhanced removal of heavy metals and metalloids by constructed wetlands: a review of approaches and mechanisms [J]. *Science of the Total Environment*, 2022(821): 153516.

CROP-WETLAND: A KIND OF CONSTRUCTED WETLAND OWNING MULTI-FUNCTIONS

LIU Ye-Ye¹, ZHAO Ya-Qian¹, SHEN Cheng^{2,3} and WEI Ting¹

(1. *State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*; 2. *School of Environment and Natural Resources, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China*; 3. *Key Laboratory of Recycling and Eco-Treatment of Waste Biomass of Zhejiang Province, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China*)

Abstract: Crop wetlands represent an integrated ecological system that combines the principles of constructed wetlands with agricultural production. By leveraging the hydrological characteristics and bioremediation functions of wetlands, crop wetlands achieve an optimized balance between wastewater treatment and crop growth. This approach mitigates the environmental pressures associated with traditional agriculture, thereby promoting sustainable development in agriculture and environmental management. This study systematically analyzed related publications, focusing on vegetation types, wetland configurations, and pollutant removal efficiencies in crop wetlands. The results indicate that paddy field is the most commonly crop wetland while rice is the largely cultivated in such systems. The predominant wetland configuration includes surface flow (51.90%), horizontal flow (33.30%), and floating treatment (11.10%), with vertical flow being less frequently employed (3.70%). Crop wetlands exhibit multiple functionalities, including water quality improvement, nutrient recovery, and integrated agricultural benefits. They are particularly suitable for treating low-concentration wastewater and perform comparably to traditional surface flow constructed wetlands. Notably, crop wetlands demonstrate a significant advantage in nutrient recycling while exhibit the development of integrated agricultural systems. Future research should focus on optimizing the design and management of crop wetlands, with particular emphasis on addressing the potential risks posed by pathogenic microorganisms emerging pollutants and heavy metal. Ensuring food safety and environmental health will be critical to achieving harmonious development between agriculture and ecosystems.

Key words: Constructed wetlands; Paddy; Crops; Nitrogen and phosphorus; Resource recovery