

粟春青, 郑卫国, 罗忻武, 等. 不同生长类型植物对水体主要污染物的净化能力研究进展[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(12): 2481-2496.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.12.020

不同生长类型植物对水体主要污染物的净化能力研究进展

粟春青, 郑卫国, 罗忻武, 韩梦梦, 宫彦章, 路洋

(广东文科绿色科技股份有限公司/广东省园林景观与生态恢复工程技术研究中心, 广东 深圳 518111)

摘要: 本文综述了近年来国内外不同植物类型修复污染水体的研究进展, 着重介绍了植物对水体氮、磷、营养盐、有机污染物和重金属的净化机理及针对不同水体污染物具有高效净化能力的水生植物和陆生植物; 总结讨论了影响植物净化效能的因素; 分析了目前陆生植物净化水体污染物研究存在的问题, 并提出了今后的研究方向。

关键词: 植物修复; 水体污染物; 水生植物; 陆生植物

中图分类号: X52; Q948.116 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)12-2481-16

Research progress on purification ability of different growth types of plants to main pollutants in water

SU Chunqing, ZHENG Weiguo, LUO Xinwu, HAN Mengmeng, GONG Yanzhang, LU Yang

(Guangdong Wenke Green Technology Co., Ltd./Guangdong Landscape and Ecological Restoration Engineering Technology Research Center, Shenzhen 518111, China)

Abstract: The research progress on phytoremediation of polluted water bodies using different types of plants at home and abroad in recent years was reviewed. The purification mechanism of plants on nitrogen and phosphorus nutrients, organic pollutants and heavy metals in water and the aquatic plants and terrestrial plants with high purification ability for different water pollutants were emphatically introduced. The influencing factors of plant purification efficiency were summarized and discussed. Current challenges in terrestrial phytoremediation research for water pollutions were analyzed, and future research directions were put forward.

Key words: phytoremediation; water pollutants; aquatic plants; terrestrial plants

随着工业化和城市化进程加快, 水体污染成为全球化的重大环境问题之一。水体污染物主要分为有机污染物、无机污染物和微生物污染物等, 有机污染物包括废水中的有机化合物, 如有机溶剂、化学品和石油产品; 无机污染物如盐类、重金属、氮、磷、悬

浮性固体等; 微生物污染物主要为细菌、病毒、寄生虫等^[1]。水体污染物主要来源于点源有机物和营养物质、农业面源营养物、矿物质污染和生物化学过程^[2], 且由于水体自净作用、环境变化等直接或间接因素影响, 水体污染物具有吸附、迁移和转化特性。张兆海等^[3]对金堤河不同水期水体污染物变化特征的研究结果表明, 各水期都会出现化学需氧量(COD_{Cr})升高, 劣 V 类水质污染表现为平水期>枯水期>丰水期, 各水质指标以总氮占比最高, 生化需氧量(BOD_5)和总磷为影响水环境的主要污染物。张华兵等^[4]监测显示, Cr、As、Hg、Mn 在江苏省盐城

收稿日期: 2024-11-26

基金项目: 深圳市科技计划项目(KCXFZ202002011006491)

作者简介: 粟春青(1996-), 女, 广西贺州人, 硕士, 工程师, 主要从事园林植物资源与生态修复研究。(E-mail) 1656702264@qq.com

通讯作者: 宫彦章, (E-mail) 493783084@qq.com

市滨海湿地 14 条入海河流中普遍存在,多数河流处于潜在污染及以上水平,且春夏季的重金属污染程度较高。杨旭等^[5]研究发现,湿地系统对污染物的降解沿水流方向逐渐降低,植物在生长季节对氮、磷的吸收同化作用更明显。

大量实践结果表明,植物修复是治理水环境污染的有效途径。其中,植物吸收、储存和去除水体污染物的能力是衡量其对水生态修复适宜性的核心指标^[6]。植物对水体的净化作用体现在多个方面:一方面,可通过吸收、富集、过滤沉淀等方式直接去除水体污染物;另一方面,凭借自身的抗污染能力与生化特性,为微生物营造适宜的生长繁殖环境,实现对污染物的截留、转移与降解。例如,植物泌氧改善根际氧化环境,根系分泌的有机物以及枯叶分解产生的有机碳源,均能为微生物降解氮、磷提供支持^[7]。此外,植物还能通过化感作用释放抑制物质,与藻类竞争光照、营养等资源,有效抑制藻类过度生长,沉水植物便是此类作用的典型代表^[8]。不同类型植物净化雨水径流和水体污染物的研究已有较多报道,水生植物和陆生植物应用较广泛,陆生植物净水研究相对较少。不同类型植物的污染物选择吸附及净化能力不同,并受多种环境因素影响,基于此,本研究总结水生植物和陆生植物对氮、磷营养盐、有机污染物和重金属等水体主要污染物的净化能力、净化机理及影响因素,筛选出应用于不同生境、不同污染物的高效净化水体污染物的植物,以期为海绵城市建设和植物水生态修复提供科学指导。

1 不同类型植物对水体氮、磷、氨态氮的净化能力

氮、磷是典型的水体污染物,总氮(TN)包括无机氮和有机氮,氨态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)是 TN 的组成部分,其中,一部分 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 易被带负电的土壤(填料)颗粒吸附去除,另一部分 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在硝化作用下转化为硝态氮,并在厌氧环境下通过反硝化作用实现脱氮。磷形态包括颗粒态磷(PP)和溶解态磷(DP)^[9]。在污水修复系统中,基质的机械截留作用和微生物的硝化、反硝化作用是脱氮除磷的主要途径,溶解氧和碳源是重要的限制因子,植株吸收累积量占总去除效应的比例较小^[9-10],如郭亚平等^[11]将 6 种不同类型湿地植物引入城镇污水处理

系统,考察其对污染物的去除效果和和湿地组合系统中的作用,结果表明植物对污水 N 元素和 P 元素的直接去除率分别为 14.0%~59.4% 和 8.6%~55.2%,但植物通过吸收、分解及促进微生物转化降解对去除污染物的作用具有协同效应,使 TN、总磷(TP)的总去除率分别达到 65.4%~83.8% 和 43.5%~69.5%。张志永等^[12]的研究结果显示,当污水氮、磷浓度较低时,以植物吸收累积作用为主,当氮、磷浓度较大时,植物吸收量在总去除效应中的占比较小。不同类型植物的净化水体污染物的能力存在较大差异。水生植物部分或全株浸没于水中,其根、茎、叶均可直接从水体中吸收营养元素,同时具备抑制藻类生长的作用,因而净化效率较高。相比之下,当前对陆生植物的净化水体污染物的研究多采用盆栽污水灌溉或浮床水培的方式。由于陆生植物耐淹能力有限,且盆栽植物与污水的实际接触时间较短,导致其净化水体污染物的能力相对较弱。

1.1 对总氮(TN)的净化能力

通过对文献[13-34]的总结发现,水生植物和陆生植物中许多物种对富营养化水体中 TN 去除率较高(表 1)。水生植物对水体中 TN 的去除率更高,部分可达 90.00% 以上,如沉水植物伊乐藻(*Eloдея canadensis*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、漂浮植物大藻(*Pistia stratiotes*)、浮叶植物睡莲(*Nymphaea tetragona*)、挺水植物再力花(*Thalia dealbata*)、黄菖蒲(*Iris pseudacorus*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、水芋(*Calla palustris*)、花蔺(*Butomus umbellatus*)、菰(*Zizania latifolia*)、美人蕉(*Canna indica*)、梭鱼草(*Pontederia cordata*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、水生鸢尾(*Iris hexagona*)、旱伞草(*Cyperus involucratus*)、铜钱草(*Hydrocotyle vulgaris*)以及红树植物海莲(*Bruguiera sexangula*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)。其中 1 m² 200 株种植密度下的金鱼藻对质量浓度为 15 mg/L 的 TN 去除率可达 99.94%^[14]。陆生植物以灌木和草本植物翠芦莉(*Ruellia simplex*)、玉簪(*Hosta plantaginea*)、麦冬(*Ophiopogon japonicus*)、马蔺(*Iris lactea*)、德国鸢尾(*Iris germanica*)、蒲苇(*Cortaderia selloana*)、芒(*Miscanthus sinensis*)、细叶芒(*Miscanthus sinensis* ‘Gracillimus’)、花叶芒(*Miscanthus sinensis* ‘Variegatus’)等对水体中 TN 的去除率较高,细叶芒对 TN 质量浓度为 9.558 mg/L 的水体中 TN 去除率最高可达 99.61%^[24]。

表 1 对水体氮、磷营养元素去除率较高的植物

Table 1 Plants with high removal efficiency for nitrogen and phosphorus nutrients in water

植物类型	总氮(TN)		氨态氮(NH ₄ ⁺ -N)		总磷(TP)		试验类型	污水水质	生长周期(d)	参考文献
	植物	去除率(%)	植物	去除率(%)	植物	去除率(%)				
水生植物 (沉水)	菹齿眼子菜、马来眼子菜、金鱼藻、黑藻、苦草、狐尾藻、伊乐藻	74.70~99.94	菹齿眼子菜、马来眼子菜、金鱼藻、黑藻、狐尾藻、苦草、浮叶眼子菜	70.58~98.75	菹齿眼子菜、马来眼子菜、浮叶眼子菜、金鱼藻、黑藻	83.59~96.30	实验室	白洋淀富营养化水体、底泥、地表V类水	21	[13]
								模拟 GB 18918-2002 一级 A 类污水	5	[14]
								模拟劣V类水	15	[15]
水生植物 (漂浮)	凤眼莲、大藻	82.4~99.59	凤眼莲、大藻、槐叶萍	90.00~99.59	凤眼莲、大藻、槐叶萍	84.10~93.60	实验室	模拟富营养化污水	20	[16]
								模拟劣V类水	15	[15]
								模拟富营养化污水	20	[16]
								模拟富营养化污水	35	[17]
水生植物 (浮叶)	睡莲、荇菜	80.10,97.76	水鳖、黄花水龙	93.64,96.31	耐寒睡莲、睡莲、水鳖、黄花水龙、荇菜	85.27~96.30	实验室	某污水处理厂出水:自来水为1:3的富营养污水	20	[18]
								模拟富营养化污水	18	[19]
								模拟劣V类水	15	[15]
								模拟富营养化污水	20	[16]
水生植物 (挺水)	菰、菖蒲、再力花、水生鸢尾、花蔺、美人蕉、千屈菜、梭鱼草、铜钱草、黄菖蒲、旱伞草、香根草、花叶芦竹、水芋	92.8~99.90	菰、菖蒲、花蔺、再力花、黄菖蒲、水生鸢尾、旱伞草、美人蕉、千屈菜、梭鱼草、铜钱草、香根草	93.24~99.94	菰、菖蒲、水葱、黄菖蒲、水生鸢尾、千屈菜、再力花、美人蕉、水葱、香根草、水蒿、水芋	83.90~98.24	实验室	采集校园富营养化污水	15	[20]
								模拟富营养化污水	20	[16]
								某污水处理厂出水:自来水为1:3的富营养污水	20	[18]
								模拟富营养化污水	15	[19]
								校园富营养化污水	15	[20]
								模拟城市道路雨水径流水	4	[21]
								排污口与江水交汇水	50	[22]
红树植物	桐花树、无瓣海桑、海莲、秋茄	89.60~97.40	秋茄、桐花树、白骨壤	95.50~97.46	海莲、桐花树、无瓣海桑、秋茄	92.80~97.40	实验室	校园化粪池出水	90	[23]
								模拟富营养化污水	35	[24]
								生活污水	120	[12]
								模拟盐度 1.5%的不同浓度污水	57	[25]
陆生植物 (乔木)	秋枫、串钱柳、水石榕、尖叶杜英、黄金榕	51.30~79.17	黄金榕、紫薇	85.00~90.39	水曲柳、旱柳、紫薇	66.32~85.00	实验室	海水+污水处理厂进水	30	[26]
								模拟富营养化污水	18	[6]
								模拟富营养化污水	13	[27]
								模拟富营养化污水	35	[28]
								生活污水	32	[29]

续表1 Continued I

植物类型	总氮(TN)		氨态氮(NH ₄ ⁺ -N)		总磷(TP)		试验类型	污水水质	生长周期(d)	参考文献
	植物	去除率(%)	植物	去除率(%)	植物	去除率(%)				
	腺柳	75.40	腺柳	95.40	腺柳	99.20	实地试验-农庄生活污水处理系统	模拟高浓度农村生活污水	5	[30]
陆生植物(灌木)	翠芦莉、花叶杞柳、夹竹桃、大叶黄杨、小叶栀子	69.00~86.70	翠芦莉、夹竹桃、花叶杞柳、小叶栀子、巴西野牡丹、月季、朱槿、锦绣杜鹃、龙船花、芙蓉菊	70.00~95.60	翠芦莉、花叶杞柳、夹竹桃、大叶黄杨、小叶栀子	70.00~95.40	实验室	模拟富营养化污水	18	[6]
	灌木柳	81.50	灌木柳	76.90	灌木柳	91.60	实地试验-农庄生活污水处理系统	模拟高浓度农村生活污水	5	[30]
陆生植物(草本)	鸢尾、玉簪、麦冬、马蔺、德国鸢尾、芒、蒲苇、花叶芒、细叶芒	71.30~99.61	玉簪、德国鸢尾、麦冬、萱草、马蔺、狐尾天门冬、吊兰、水鬼蕉、蕹菜	71.98~95.60	酸模叶蓼、文殊兰、水竹叶、萱草、马蔺、玉簪、玫瑰、姜花、非洲菊	82.50~99.15	实验室	模拟富营养化污水	18	[6]
								模拟富营养化污水	35	[24]
								模拟生活污水	32	[29]
								模拟不同浓度污染雨水	1	[32]
								某猪场废水	30	[33]
								校园生活污水并添加15 mg/L锰离子	5	[34]

1.2 对氨态氮(NH₄⁺-N)的净化能力

由表 1 可知,水生植物中金鱼藻、凤眼莲(*Pontederia crassipes*)、大藻、水鳖(*Hydrocharis dubia*)、黄花水龙(*Jussiaea stipulacea*)、香根草(*Vetiveria zizanioides*)、花蔺、再力花、菖蒲、黄菖蒲、水生鸢尾、旱伞草、菰、美人蕉、千屈菜、梭鱼草、铜钱草以及红树植物桐花树、秋茄(*Kandelia obovata*)、白骨壤(*Avicennia marina*)等对水体中氨态氮去除率均大于 90.00%,铜钱草对初始质量浓度为 10.02~11.40 mg/L 的氨氮去除率达 99.94%^[19]。陆生植物中黄金榕(*Ficus microcarpa* ‘Golden Leaves’)、翠芦莉、玉簪、德国鸢尾、麦冬、萱草(*Hemerocallis fulva*)、马蔺、蕹菜(*Ipomoea aquatica*)等对水体中氨态氮去除率均在 90.00% 以上,翠芦莉对氨态氮质量浓度为 4.98 mg/L 的水体中氨态氮去除率为 95.60%^[31]。

1.3 对总磷(TP)的净化能力

从表 1 可知,水生植物浮叶眼子菜(*Potamogeton natans*)、大藻、槐叶萍(*Salvinia natans*)、水芋、耐寒睡莲(*Nymphaea tetragona*)、水鳖、黄花水龙、荇菜(*Nymphoides peltata*)、黄菖蒲、水生鸢尾、千屈菜、再力花、菖蒲、菰、美人蕉、香根草、水葱(*Schoenoplectus tabernaemontani*)以及红树植物海莲、桐花树、无瓣海桑等对水体中 TP 去除率均高于 90.00%;陆生植物的腺柳(*Salix chaenomeloides*)、灌木柳(*Salix saposnikovii*)、翠芦莉、萱草、马蔺、玉簪、玫瑰(*Rosa rugosa*)、姜花(*Hedychium coronarium*)、非洲菊(*Gerbera jamesonii*)对水体中 TP 均具有良好的去除效果,腺柳对 TP 质量浓度为 23.80 mg/L 的水体中 TP 去除率达 99.20%^[30]。

2 不同类型植物对水体有机物的净化能力

化学需氧量(COD_{Cr})是衡量水中有机物浓度的重要指标,生化需氧量(BOD₅)是指好氧微生物分解

水中有机物过程中消耗水中溶解氧的量 (DO), BOD_5 高的水体通常会导致氧气不足, 水体中有机污染程度较高^[35]。植物对 COD_{Cr} 的降低主要通过物理截留及附着于基质和植物根系的微生物降解作用^[17], 植物吸收作用对 BOD_5 、 COD_{Cr} 的削减量通常较小较慢, 根际微生物成为吸附和吸收水体有机物的关键因素^[15]。研究结果显示, 污水中 BOD_5 的降低量与微生物数目呈显著正相关^[36], 植物根系泌氧量与 COD_{Cr} 的降低量密切相关^[16]。植物可直接吸收小分子有机物并对其进行分解, 此外, 植物根系可促进微生物繁殖, 并能通过根系泌氧提高水中好氧

微生物活性和系统的 DO 值, 从而影响有机污染物的生物降解过程^[36]。

2.1 对化学需氧量 (COD_{Cr}) 的降低能力

由表 2 可知, 水生植物中漂浮植物豆瓣菜 (*Nasturtium officinale*), 挺水植物菖蒲、水芹 (*Oenanthe javanica*)、水葱、黄菖蒲、香蒲 (*Typha orientalis*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、旱伞草的 COD_{Cr} 降低率均在 90.00% 以上; 陆生植物以柳树 (*Salix matsudana*)、紫薇、腺柳及姜花、非洲菊对 COD_{Cr} 的降低效果较好, 其中挺水植物香蒲系统、陆生植物柳树系统对高质量浓度 COD_{Cr} (462.9 mg/L) 的降低率最高分别可达 95.90%、90.20%^[36]。

表 2 对水体有机污染物去除率较高的植物

Table 2 Plants with high removal efficiency for organic pollutants in water

植物类型	化学需氧量 (COD_{Cr})		生化需氧量 (BOD_5)		试验类型	污水水质	生长周期 (d)	参考文献
	植物	降低率 (%)	植物	降低率 (%)				
水生植物 (沉水)	苦草、黑藻、金鱼藻、穗花狐尾藻、伊乐藻、波叶海菜花	64.90~89.20	穗花狐尾藻、金鱼藻	77.40~84.00	实验室	模拟富营养化污水	35	[17]
						污水处理厂污水	7	[37]
						模拟富营养化污水	25	[38]
						采集黑臭河道废水	26	[39]
水生植物 (漂浮)	凤眼莲、大藻、豆瓣菜	86.73~95.40	凤眼莲、大藻、豆瓣菜	88.37~94.90	实验室	模拟富营养化污水	15	[19]
						校园富营养化污水	20	[40]
						某下水道出口污水	20	[41]
水生植物 (浮叶)	荇菜、耐寒睡莲、黄花水龙、水鳖、水龙	75.58~82.20	水龙、荇菜	73.45~78.23	实验室	模拟劣 V 类	15	[15]
			大藻	76.86		实地试验-潜流人工湿地	河北永定河受污染入库源水	90
水生植物 (挺水)	菖蒲、再力花、水生鸢尾、花蔺、美人蕉、千屈菜、梭鱼草、旱伞草、铜钱草、荷花、菰、盾叶天胡荽、水芹、香蒲、芦苇、黄菖蒲、水葱、黄花鸢尾、石菖蒲	76.11~95.90	盾叶天胡荽、水芹、香蒲、芦苇、千屈菜、黄菖蒲、菖蒲、石菖蒲、黄花鸢尾	76.41~98.70	实验室	模拟富营养化污水	25	[38]
						模拟劣 V 类	15	[15]
						模拟富营养化污水	15	[19]
						模拟城市道路雨水径流水质	4	[21]
						排污水+江水	50	[22]
						模拟富营养化污水	6	[36]
						模拟富营养化污水	25	[38]
						黑臭河道废水	26	[39]
						校园富营养化水体	20	[40]
						某下水道出口污水	20	[41]
红树植物	秋茄、海桑、木榄、桐花树	66.60~85.30	海桑、桐花树、木榄、无瓣海桑	85.00~95.00	实验室	模拟盐度为 1.5% 的人工污水	57	[25]
						校园化粪池出水	90	[42]
						校园化粪池出水	365	[43-44]

续表2 Continued2

植物类型	化学需氧量(COD_{Cr})		生化需氧量(BOD_5)		试验类型	污水水质	生长周期(d)	参考文献
	植物	降低率(%)	植物	降低率(%)				
陆生植物(乔木)	紫薇、水翁、柳树	75.70~90.20	水翁、柳树	73.20~96.80	实验室	模拟生活污水	32	[29]
						模拟富营养化污水	6	[36]
						校园生活污水	3	[45]
	腺柳	89.90			实地试验-农庄生活污水处理系统	模拟高浓度农村生活污水	5	[30]
陆生植物(灌木)	大叶黄杨、夹竹桃、花叶杞柳、小叶梔子、互叶白千层、翠芦莉	70.00~89.90	互叶白千层	85.23	实验室	模拟城市道路雨水径流水质	4	[21]
						模拟生活污水	32	[29]
						校园化粪池出水	365	[43]
陆生植物(草本)	丝带草、鸢尾、玉簪、蕹菜、玫瑰、姜花、非洲菊	81.00~89.90	丝带草、玫瑰、姜花、非洲菊	82.14~95.12	实验室	模拟城市道路雨水径流水质	4	[21]
						校园化粪池出水	90	[23]
						模拟污染雨水	1	[32]
						某猪场废水	30	[33]
						某下水道出口污水	20	[41]

2.2 对生化需氧量(BOD_5)的降低能力

由表 2 可知,实验室中豆瓣菜、芦苇、香蒲、千屈菜、菖蒲、黄菖蒲、黄花鸢尾(*Iris wilsonii*)、水芹以及红树植物木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)、桐花树、无瓣海桑、海桑(*Sonneratia caseolaris*)等水生植物对 BOD_5 的降低率大于 85.00%;实地长期试验中大藻对 BOD_5 的降低率也能达到 76.86%^[35];陆生植物以柳树、互叶白千层(*Melaleuca alternifolia*)和草本植物玫瑰、姜花、非洲菊对水体 BOD_5 降低率较高,其中芦苇系统、柳树系统对高质量浓度 BOD_5 (232.80 mg/L) 的降低率分别达 98.70%、96.80%^[36]。

3 不同类型植物对水体重金属的净化能力

植物修复同样适用于处理包括重金属在内的无机物,一些重金属对植物生长至关重要,如铜、锌、钼、铁、锰等元素参与植物的正常生理活动。然而,重金属浓度过低或过高都可能对植物生长产生抑制作用。在水污染修复中,植物种类选择基于其耐受、吸收、富集或转移污染物的能力^[46],植物去除水中重金属的途径包括植物稳定化、植物提取、根际过滤、植物挥发等^[47]。植物对重金属的富集能力可用

生物富集系数(BCF)表示, BCF 反映了植物对某一重金属的吸收和积累能力,通常情况下 BCF 越高植物的富集效应越强, BCF 大于 1 是重金属超量积累植物区别于普通植物的重要特征之一^[48]。目前研究发现的超富集植物有 700 多种,一些被广泛应用的超富集植物包括拟南芥[主要富集镉(Cd)和锌(Zn)]、蜈蚣草[主要富集砷(As)和铬(Cr)]、向日葵(主要富集 Zn、Cr、Cd)、蓖麻[主要富集汞(Hg)]和芥菜[主要富集铅(Pb)、镍(Ni)、Zn、Cr、Cd]等^[46,49],但多集中于土壤生态系统。研究显示水生植物修复水体重金属污染优势显著,水生植物物种丰富,吸收富集面大,可通过收割或清除植物将重金属从水中分离去除。不同水生植物对重金属的净化能力存在差异,一般认为,沉水植物>漂浮(浮叶)植物>挺水植物^[46,50]。

3.1 对铅(Pb)的净化能力

本文对水体多种重金属去除率或富集系数较高的不同生活型植物进行了总结(表 3)。从表 3 可知,水生植物中狐尾藻、黑藻、凤眼莲、大藻、美人蕉、马蔺、菖蒲、鸢尾等对 Pb 的去除率均大于 90%;芦苇、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、荷花(*Nelumbo nucifera*)、菰、中华慈姑、水鳖在 Pb 质量浓度为 1 mg/L 时根系生物富集系数从小到大依次

表 3 对水体铅、镉去除率和富集能力较高的植物

Table 3 Plants with high removal efficiency and enrichment capacity for lead and cadmium in water

生活型	铅(Pb)			镉(Cd)			试验类型	污水水质	生长周期(d)	参考文献
	植物	去除率(%)	生物富集系数(BCF)	植物	去除率(%)	生物富集系数(BCF)				
水生植物(沉水)	黑藻、狐尾藻/金鱼藻	94.35~98.38	13.77	菹草、伊乐藻、苦草、龙须眼子菜、竹叶眼子菜、黑藻/金鱼藻	90.00~96.53	1.22	实验室	模拟不同浓度重金属污水	14.00	[51]
								湘西东河水添加不同重金属	0.08	[52]
								养殖塘底泥+自来水	180.00	[53]
								模拟不同浓度重金属污水	45.00	[54]
水生植物(漂浮)	苦草		1.17	狐尾藻、黑藻、金鱼藻、苦草		2.00~6.74	实地试验	河道底泥配置不同浓度重金属污水	120.00	[55]
								某湿地植物及根部底泥	-	[56]
								上海53条河道水体、植物、沉积物	-	[57]
水生植物(挺水)	风眼莲、大藻/风眼莲	97.23~98.33	6.90	风眼莲、大藻	84.00~90.40		实验室	河道底泥配置不同浓度重金属污水	120.00	[55]
								鱼塘水并添加重金属	24.00	[58]
水生植物(浮叶)	水鳖、浮萍		19.16~33.41				实地试验	芜湖某工业区水域植物、水样	-	[59]
								模拟不同浓度重金属污水	14.00	[60]
水生植物(挺水)	睡莲		6.03	禾叶慈姑		31.91~222.94	实验室	上海某工业河底泥	180.00	[61]
								芜湖某工业区水域植物、水样	-	[59]
								河道底泥配置不同浓度重金属污水	120.00	[55]
水生植物(挺水)	石菖蒲、美人蕉、旱伞草、鸢尾、马蔺、菖蒲/旱伞草	83.20~98.00	3.73	西伯利亚鸢尾、石菖蒲、美人蕉、旱伞草、鸢尾、马蔺、菖蒲	90.20~99.47		实验室	模拟重金属污水	60.00	[62]
								大沽排污水	50.00	[63]
								某湿地植物及根部底泥	-	[56]
水生植物(挺水)	空心莲子草、芦苇、菖、香蒲、荷花		4.92~16.18	再力花、空心莲子草		4.68~10.70	实地试验	芜湖某工业区水域植物、水样	-	[59]
								中国13个红树林保护区植物、沉积物	-	[64]
红树植物	角果木		1.42	白骨壤、正红树、秋茄、桐花树、红海榄、海漆、海桑、无瓣海桑、黄槿、木榄、角果木、水柳、木果楝		1.22~61.44	实地试验	海南东寨港红树林水样、植物、沉积物	-	[65]
								模拟不同浓度重金属污水	25.00	[66]
陆生植物(灌木)				栀子、冬青卫矛、红花檵木		1.32~4.60	实验室			

续表3 Continued3

生活型	铅(Pb)		镉(Cd)		试验类型	污水水质	生长周期(d)	参考文献	
	植物	去除率(%)	生物富集系数(BCF)	植物					去除率(%)
陆生植物(草本)	早生美人蕉、似莎草、泽生藁草、藜草/马唐、多花黑麦草、蜈蚣草、石菖蒲、狐尾草、向日葵、蓖麻、紫花苜蓿、芥菜	95.00~98.00	1.66~6.67	酸模、早生美人蕉、似莎草、泽生藁草、藜草/多花黑麦草、蜈蚣草、石菖蒲、狐尾草、向日葵、蓖麻、紫花苜蓿、芥菜、南荻、火炭母、花叶藜草、牵牛	76.81~95.39	1.08~15.08	实验室	河道底泥配置不同浓度重金属污水	120.00 [55]
								大沽排污水	50.00 [63]
								模拟不同浓度重金属污水	25.00 [66]
								城市尾水添加不同浓度重金属	20.00 [67]
								模拟不同浓度重金属污水	30.00 [68]
								模拟不同浓度重金属污水	12.00 [69]
								模拟不同浓度重金属污水	35.00 [70]
								养殖场猪粪配置不同浓度污水	60.00 [71]
								模拟不同浓度重金属污水	7.00 [72]

植物栏中“/”前的植物对水体重金属的净化能力用去除率表示;“/”后面的植物对水体重金属的净化能力用生物富集系数表示。

为 $6.99 < 8.12 < 11.10 < 16.18 < 28.51 < 33.41$ ^[59],浮萍全株富集系数为 19.16 ^[59],多数红树植物对Pb的BCF均不高^[64-65],仅角果木(*Ceriops tagal*)茎的BCF达到 1.42 ^[65]。陆生草本植物早生美人蕉(*Canna generalis*)、似莎草(*Carex pseudocyperus*)、泽生藁草(*Carex riparia*)、藜草(*Phalaris arundinacea*)等的Pb去除率均在90%以上,蜈蚣草(*Eremochloa ciliaris*)、石菖蒲(*Acorus gramineus*)、多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)在Pb质量浓度为 10 mg/L 时BCF分别为 3.01 、 3.59 、 3.71 ^[68],向日葵(*Helianthus annuus*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、蓖麻(*Ricinus communis*)在 Pb^{2+} 质量浓度为 50 mg/L 时根部BCF分别为 6.67 、 4.83 、 3.21 ,芥菜(*Brassica juncea*)在 Pb^{2+} 质量浓度为 100 mg/L 时根部BCF为 4.34 ^[70]。

3.2 对镉(Cd)的净化能力

从表3可见,对水体重金属Cd净化率较高的水生植物有菹草(*Potamogeton crispus*)、伊乐藻、苦草(*Vallisneria spiralis*)、龙须眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)、竹叶眼子菜(*Potamogeton malaianus*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)、凤眼莲、美人蕉、马蔺、菖蒲、旱伞草、鸢尾、石菖蒲、西伯利亚鸢尾(*Iris sibirica*)

等,去除率均在90.00%以上,其中,菖蒲在 Cd^{2+} 质量浓度为 1 mg/L 时去除率最高为 99.47% ^[63],黑藻在 Cd^{2+} 质量浓度为 5 mg/L 时削减率达到 96.53% ^[51],再力花、狐尾藻、空心莲子草地下部对Cd的BCF分别为 4.68 、 6.74 、 10.70 ^[56],白骨壤、正红树(*Rhizophora apiculata*)、秋茄、桐花树、无瓣海桑、黄槿(*Talipariti tiliaceum*)、角果木、红海榄(*Rhizophora stylosa*)、木果楝(*Xylocarpus granatum*)等多数红树植物对Cd的BCF均大于 1.00 ,秋茄茎的BCF达 61.44 ^[65],禾叶慈姑地下部在 Cd^{2+} 质量浓度为 10 mg/L 、 50 mg/L 时BCF分别可达 222.94 、 50.99 ^[60]。陆生植物以早生美人蕉的Cd去除率较高^[63];在质量浓度 $50 \text{ } \mu\text{g/L}$ 镉处理下,红花檵木(*Loropetalum chinense var. rubrum*)叶片的BCF为 4.60 ,花叶藜草(*Phalaris arundinacea var. picta*)根部的BCF为 3.17 ^[66];向日葵在 Cd^{2+} 质量浓度为 20 mg/L 时根部BCF达 11.89 ,蓖麻、紫花苜蓿、芥菜在 Cd^{2+} 质量浓度为 10 mg/L 时根部BCF分别为 4.65 、 14.41 、 10.29 ^[70]。

3.3 对锰(Mn)的净化能力

从表4可见,水生植物中凤眼莲、大藻、水龙、美

人蕉、花叶美人蕉、水竹叶 (*Murdannia triquetra*)、水芋、水葱、芦苇、灯芯草、菰、香蒲等对 Mn 的去除率均在 90.00% 以上,菰系统在 Mn²⁺ 质量浓度为 65.6 mg/L 时 7 d 后的去除率达 99.9%^[77],美人蕉、水龙、水竹叶在 Mn²⁺ 质量浓度为 15 mg/L 时去除率分别可达 99.50%、99.20%、98.70%^[34],凤眼莲在锰为 10 mg/L 高质量浓度时 70 d 后的总去除率为 98.59%^[73]。水生植物狐尾藻、黑藻、菹草、水鳖、睡莲、萍蓬草 (*Nuphar pumilum*)、再力花、香蒲、美人蕉、空心莲子草以及红树植物秋茄、桐花树对 Mn 的 BCF 均大于 1.00,狐尾藻、空心莲子草地下部对 Mn 的 BCF 值分别可达 10.32、8.81,富集能力较好^[56]。陆生植物中酸模叶蓼 (*Persicaria lapathifolia*)、文殊兰 (*Crinum asiaticum* var. *sinicum*) 在 Mn²⁺ 质量浓度为 15 mg/L 时去除率均在 95.00% 以上^[34],豆瓣绿 (*Peperomia tetraphylla*)、绿萝 (*Epipremnum aureum*)

在 Mn²⁺ 质量浓度为 55 mg/L 和 155 mg/L 时 BCF 分别可达 14.77、48.74 和 12.18、20.82^[80]。

3.4 对铜 (Cu) 的净化能力

从表 4 可见,金鱼藻、穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*)、凤眼莲、大藻、美人蕉、黄菖蒲、旱伞草等对 Cu 的去除率均在 90.00% 以上,凤眼莲、大藻在 Cu²⁺ 质量浓度为 10 mg/L 时 70 d 的总去除率可达 99.87%~100.00%^[73]。香蒲、芦苇、荷花、中华慈姑、空心莲子草、菰、水鳖在 Cu 质量浓度为 9 mg/L 时根部 BCF 分别为 2.54、2.99、3.02、3.80、4.19、6.10、9.12,浮萍全株 Cu 富集系数为 8.25^[59],睡莲、梭鱼草根在 Cu 质量浓度为 5~15 mg/L 时 BCF 分别为 35.00~150.00、28.00~143.00^[75],红树植物以红海榄的 BCF 最大,为 5.38^[65]。陆生植物中绿萝在 Cu 质量浓度为 0.6 mg/L 时 14 d 的去除率为 92.00%^[79]。

表 4 对水体锰、铜去除率和富集能力较高的植物

Table 4 Plants with high removal efficiency and enrichment capacity for manganese and copper in water

生活型	锰 (Mn)		铜 (Cu)		试验类型	污水水质	生长周期 (d)	参考文献	
	植物	去除率 (%)	生物富集系数 (BCF)	植物					去除率 (%)
水生植物 (沉水)	穗花狐尾藻、金鱼藻、龙须眼子菜、竹叶眼子菜/黑藻、菹草	62.99~86.00	3.72、3.76	穗花狐尾藻、金鱼藻、狐尾藻/黑藻、金鱼藻、水盾草、苦草	74.00~98.63	1.41~5.10	实验室	湘西东河水添加不同重金属	0.08 [52]
	狐尾藻		10.32	黑藻、金鱼藻、苦草		3.07~27.23	实地试验	河道底泥配置不同浓度重金属污水	120.00 [55]
								模拟不同浓度重金属污水	84.00 [73]
水生植物 (漂浮)	凤眼莲、大藻/凤眼莲	80.58~98.59	1.50	凤眼莲、大藻、肚兜萍	82.97~100.00		实验室	某湿地植物及根部底泥	- [56]
	水鳖		1.01	浮萍、水鳖		8.25~9.12	实地试验	上海 53 条河道水体、植物、沉积物	- [57]
								河道底泥配置不同浓度重金属污水	120.00 [55]
水生植物 (浮叶)	水龙/睡莲	99.20	2.72	睡莲	89.00~92.00	35.00~150.00	实验室	模拟不同浓度重金属污水	84.00 [73]
								模拟不同浓度重金属污水	10.00 [74]
								芜湖某工业区水域植物、水样	- [59]
							校园生活污水添加 15 mg/L 锰离子	5.00 [34]	
							上海某工业河底泥	180.00 [61]	
							模拟重金属污水	30.00 [75]	

续表4 Continued4

生活型	锰(Mn)			铜(Cu)			试验类型	污水水质	生长周期(d)	参考文献
	植物	去除率(%)	生物富集系数(BCF)	植物	去除率(%)	生物富集系数(BCF)				
	萍蓬草		6.69	中华慈姑		3.80	实地试验	某湿地植物及根部底泥	-	[56]
水生植物(挺水)	美人蕉、花叶美人蕉、早伞草、水芋、水竹叶、黄菖蒲、水葱、芦苇、灯芯草、菰、香蒲/香蒲、美人蕉	83.29~99.90	4.33、1.91	美人蕉、黄菖蒲、石菖蒲、早伞草、铜钱草/再力花、千屈菜、芦苇、菰、香蒲、荷花、梭鱼草	85.64~99.13	1.15~143.00	实验室	芜湖某工业区水域植物、水样	-	[59]
								校园生活污水添加 15 mg/L 锰离子	5.00	[34]
								河道底泥配置不同浓度重金属污水	120.00	[55]
								模拟不同浓度重金属污水	84.00	[73]
								模拟重金属污水	30.00	[75]
水生植物(挺水)	水葱、再力花、空心莲子草	1.16~8.81		空心莲子草、芦苇、千屈菜、梭鱼草、再力花、黄菖蒲、菰、香蒲、荷花	1.04~11.65	实地试验	模拟重金属污水	8.00	[76]	
							模拟重金属污水	7.00	[77]	
							某湿地植物及根部底泥	-	[56]	
							上海 53 条河道水体、植物、沉积物	-	[57]	
							芜湖某工业区水域植物、水样	-	[59]	
红树植物	秋茄、桐花树	1.50~2.00		海漆、黄槿、角果木、水柳、木果楝、秋茄、红海榄	1.60~5.38	实地试验	中国 13 个红树林保护区植物、沉积物	-	[64]	
							海南东寨港红树林水样、植物、沉积物	-	[65]	
							泉州湾红树林潮滩植物、沉积物	-	[78]	
							校园生活污水添加 15 mg/L 锰离子	5.00	[34]	
陆生植物(草本)	酸模叶蓼、文殊兰/马唐、豆瓣绿、绿萝	95.00~97.00	2.23~48.74	莎草、酸模、绿萝、似莎草、泽生草、藜草	77.54~92.00	实验室	河道底泥配置不同浓度重金属污水	120.00	[55]	
							城市尾水添加不同浓度重金属	20.00	[67]	
							模拟不同浓度重金属污水	12.00	[69]	
							模拟不同浓度重金属污水	14.00	[79]	
							模拟不同浓度重金属污水	28.00	[80]	

植物栏中“/”前的植物对水体重金属的净化能力用去除率表示;“/”后面的植物对水体重金属的净化能力用生物富集系数表示。

3.5 对铬(Cr)的净化能力

从表 5 可知,水生植物李氏禾(*Leersia hexandra*)、水葱、芦苇、香蒲、菰、灯芯草、鼈囊薹草(*Carex schmidtii*)、早伞草在 Cr 去除率较高,其中李氏禾湿

地在 Cr(VI)质量浓度为 5.0 mg/L、7.5 mg/L 时去除率分别达到 99.96%、99.81%^[83],当铬质量浓度小于 20 mg/L 时,水葱、芦苇系统 7 d 的去除率分别达到 99.70%、99.30% 以上^[77],当铬质量浓度大于 20

mg/L时,香蒲、菰系统对 Cr 的平均去除率分别达 96.30%、97.70%^[77],狐尾藻、黑藻、苦草、凤眼莲、睡莲、红海榄、角果木、秋茄及陆生植物臭草 (*Melica scabrosa*)、虎尾草 (*Chloris virgata*)、牵牛对 Cr 的 BCF 均大于 1.00,臭草地下部在质量浓度为 60 g/L 生猪粪便废水中对 Cr 的 BCF 较高,为 3.59^[71]。

表 5 对水体铬、汞去除率和富集能力较高的植物

Table 5 Plants with high removal efficiency and enrichment capacity for chromium and mercury in water

生活型	铬(Cr)			汞(Hg)			试验类型	污水水质	生长周期(d)	参考文献
	植物	去除率(%)	生物富集系数(BCF)	植物	去除率(%)	生物富集系数(BCF)				
水生植物(沉水)	黑藻/狐尾藻、黑藻	69.23	1.47、2.42	穗花狐尾藻、金鱼藻、菹草、黑藻/菹草、黑藻	90.75~94.85	1.25、1.60	实验室	模拟不同浓度重金属污水	14	[51]
								养殖塘底泥+自来	180	[53]
								河道底泥配置不同浓度重金属污水	120	[55]
								模拟不同浓度重金属污水	84	[73]
	黑藻、金鱼藻、苦草		1.22~14.79				实地试验	上海 53 条河道水体、植物、沉积物	-	[57]
水生植物(漂浮)	凤眼莲、大藻、肚兜萍/凤眼莲	75.86~80.06	3.58	凤眼莲、大藻、羽叶满江红	94.00~95.45		实验室	河道底泥配置不同浓度重金属污水	120	[55]
								鱼塘水并添加重金属	24	[58]
								模拟不同浓度重金属污水	10	[74]
								模拟不同浓度重金属污水	6	[81]
水生植物(浮叶)	睡莲		2.45				实验室	上海某工业河底泥	180	[61]
水生植物(挺水)	香蒲、水葱、芦苇、灯芯草、菰、香蒲、膨囊藻草、李氏禾、旱伞草	76.99~99.96		美人蕉、黄菖蒲	79.56~80.42		实验室	模拟不同浓度重金属污水	84	[73]
								模拟重金属污水	7	[77]
								稻田废水和被污染河水	28	[82]
								模拟重金属污水	33	[83]
红树植物	红海榄、角果木、秋茄		1.66~2.14	红海榄、角果木		1.63~2.20	实地试验	中国 13 个红树林保护区植物、沉积物	-	[64]
								海南东寨港红树林水样、植物、沉积物	-	[65]
陆生植物(草本)	绿萝/臭草、虎尾草、牵牛	86.00	2.68~3.59	牵牛		1.50	实验室	养殖场猪粪配置不同浓度污水	60	[71]
								模拟不同浓度重金属污水	7	[72]
								模拟不同浓度重金属污水	14	[79]
		艾草、葱苣、皱叶酸模	1.37~1.77					实地试验	重庆桂溪河段	180

“/”见表 3 注。

3.6 对汞(Hg)的净化能力

从表 5 可知,对水体 Hg 去除率较高的植物有穗花狐尾藻、金鱼藻、菹草、黑藻、凤眼莲、大藻、美人蕉、黄菖蒲等,其中穗花狐尾藻、大藻在汞质量浓度为 10 mg/L 时 70 d 的总去除率可达 94.85%^[73],羽叶满江红(*Azolla pinnata*)在 Hg 质量浓度为 3 mg/L 时 6 d 的去除率为 94.00%^[81]。水生植物菹草、黑藻,红树植物红海榄、角果木以及陆生草本牵牛对汞的 BCF 均大于 1.00。

4 影响植物对水体污染物净化能力的因素

4.1 季节与植物管理

由于植物生长与季节变化密切相关,处理系统的净污能力会随之呈现出季节差异。在黑龙江省大庆湿地,春、夏生长季植物的氮、磷含量增长较快,湿地净水效果相应更好,秋季植物成熟衰老,水质净化效果较差^[5]。靖元孝等^[44]综合一年观察结果发现,由于广东省广州市 1-2 月温度较低,3 种红树植物人工湿地 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率较低,TN 平均去除率为 38%,5-12 月为植物快速生长期, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率均处于较高水平。Schüek 等^[69]的研究结果显示,低温降低了两种草本植物对 Cd、Cu、Pb、Zn 和 Cl 的去除率,盐度增加降低了两种植物对 Cd、Pb 的去除率,所有处理对重金属的去除率普遍较高,使用合适的植物种类在寒冷的盐水中也可以实现重金属有效去除。此外,合理的植物收割管理有利于水中营养物质转移,也利于水生动物的活动与生存,黄海平等^[85]研究发现,收割促进了水蕹菜的分蘖及对 N、P 元素的吸收固定,并有助于改善水体的 DO 状况。苏倩^[86]研究认为,在 6-8 月穗花狐尾藻、蓖齿眼子菜应在生长旺盛期时将其收割,此时植物的氮、磷含量达到峰值,水体中氮、磷含量相对较低,但收割后植物残体腐败会相对增加水体和底泥中氮、磷积累量。马明海等^[87]的研究结果也表明,高生物量密度下植物的腐解易加剧水质恶化,恢复水质所需时间更长。

4.2 植物选择性吸收特性

植物对水体营养盐、重金属的吸收能力各有差异,不同植物种类及器官部位对各种水体污染物具有选择性吸收特性。任文君等^[13]的研究结果表明,4 种沉水植物对水体总磷的去除能力和去除率黑藻

最好,对总氮和氨态氮的去除率金鱼藻最好。赵丹慧等^[82]的研究结果显示,4 种植物对污染河水中 Cr、Pb、Cu 和 Zn 的累积去除率分别在 79.64%~95.48%、24.26%~69.49%、2.03%~3.46% 和 31.43%~64.98%,表现为 Cr>Zn>Pb>Cu。张丽玲等^[78]研究发现,桐花树、秋茄对 Mn、Cu、Cr 和 Zn 的 BCF 均表现为叶>根>枝,桐花树、秋茄对 Pb、Fe、V、Co、Ni 的 BCF 为根>叶>枝,多数植物根部对重金属的富集系数大于茎、叶,与植物对重金属的生态适应性有关,植物会把污染物阻滞在根部,若茎和叶对重金属的积累能力较强,可能是由于根部向地上部位有较高的迁移率^[59]。基于植物材料的吸附性能,目前已开发出许多去除水体污染物的植物改性材料、植物基生物炭等,如改性菹草材料对 Cr(VI)的去除率可达 99.6%,吸附量最大为 64.5 mg/g,与未改性菹草材料相比提高了 84.3%^[88]。王烽圣等^[89]制备了改性热解菖蒲生物炭,对水中磷的去除率和平衡吸附量分别为 98.48%、24.62 mg/g。

4.3 植物生物量与根系特征

植物根系泌氧和分泌物能促进根际微生物硝化与反硝化作用,根系与微生物共同作用改变根际生态环境,促进植物对水体污染物的吸收和降解,使净化系统的总去除率显著提高^[10,73]。一般认为,根系发达的植物对重金属的耐受和富集能力较强,此外,植物对水体污染物的去除能力及积累量与生物量密切相关,提高生物量是增强植物吸收能力的重要途径之一^[32,54]。李光辉等^[90]研究发现,不同湿地植物的水体溶解氧浓度与植株重金属积累量呈显著正相关,湿地植物对重金属的吸收富集能力很大程度上取决于其根系泌氧作用。王玮^[16]的研究结果表明,植物根系泌氧量与水中耗氧有机物的去除率的相关性达极显著水平,9 种水生植物中花叶芦竹、再力花、旱伞草的平均泌氧率较高,其 COD_c 削减量也较高。靖元孝等^[44]的试验结果显示,海桑和桐花树的人工湿地污水净化系统对氮、磷的去除率显著高于木榄系统,主要原因是海桑和桐花树的生长速率明显快于木榄。在陆生植物盆栽净水试验中,由于水力停留时间(HRT)短,随时间延长基质吸附渐趋饱和,且容器空间有限,某种程度上束缚了植物根系生长,净化率呈下降至稳定趋势,这可能与实际应用时的净化率存在一定差异,需进一步改良陆生植物净水研究的试验方法。

4.4 水力停留时间

通常,水力停留时间越长,湿地系统中植物生长越稳定,对污染物的净化效果越好。如8种水生植物对4种污染物的去除率随时间增加而增加,在20 d时去除率达到峰值^[41]。Yamamoto等^[91]发现,HRT为1~15 d时,种植植物的人工湿地对水体污染物的去除率随HRT增加而增加,而无植物人工湿地即使在15 d的HRT下,对水体污染物的去除率也低于12%。方伟成^[76]的研究结果表明,5种水生植物对Cu²⁺的去除能力均随着吸附时间延长呈增加趋势。现有的许多研究结果显示,最佳HRT出现时间及维持时间均较短,如11种水生植物系统随HRT增加对TN、NH₄⁺-N、TP去除率及COD_{Cr}降低率达到较高水平并保持相对稳定,8~13 d的去除效果较好,HRT为18 d时部分植物的污染物去除率有所降低^[19]。翟旭^[36]研究发现,HRT为4 d时,6种湿地植物系统对TP、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的平均去除率及COD_{Cr}、BOD₅降低率均大于90%,而在5~6 d时,对NH₄⁺-N去除率及COD_{Cr}、BOD₅降低率明显下降。这可能是受到植物生长与基质吸附饱和影响,如植物进行正常生理活动时产生的代谢废弃物会影响水体污染物浓度,在植物净化能力不足时加重水污染^[31]。

4.5 污染物浓度

前人研究结果表明,水体污染浓度过高会对植物生长产生抑制作用,影响其正常的生理活动。如高浓度重金属混合污染下菰和菖蒲不能存活^[22],3种沉水植物的生长耐受性随水体镉浓度的增加而变差^[54]。秦蕾蕾等^[37]研究发现,黑藻、金鱼藻、波叶海菜花(*Ottelia acuminata*)在低浓度生活污水中生长良好,污染物去除率最大,高浓度污水下植物出现枯萎或根茎腐败现象,黑藻的NH₄⁺-N去除率仅为42.17%。翟旭^[36]的试验结果表明,低浓度污水条件下,5种植物系统的TP去除率均在90%以上,植物对中、低浓度污水的去污率均高于高浓度污水。史永富等^[74]的研究结果显示,水中重金属浓度暴露水平为污水排放标准限量浓度的2倍时,植株对Cr、Cu、Zn、Cd、Ni的累计去除率最高,介于72.19%~82.97%,而当暴露水平为10倍时,植株会遭到不可逆的损害甚至死亡。潘霞等^[68]研究发现,4种单一植物在低浓度污水条件下对Pb、Cd的BCF均显著大于高浓度污水,而4种植物组合对高浓度污水中

TN、TP去除率均高于低浓度污水,去除率均大于90%。

4.6 pH值

pH值通过调节水体污染物形态从而间接影响植物对污染物的富集效率。张饮江等^[54]研究发现,在一定的pH范围内,随着pH升高,3种沉水植物对Cd的去除率逐渐增加。胡绵好等^[40]研究发现,豆瓣菜和水芹净水系统对TN的去除率及COD_{Cr}、BOD₅降低率均以pH为8.9处理最高,均大于70%,TP在pH为6.7时去除率最高。林海等^[15]认为,在弱碱性环境(pH=8)下,植物根际反硝化细菌等微生物活性增强,使耐寒睡莲和苕菜对NH₄⁺-N的去除能力明显提升,而当水体pH值波动时,不能稳定去除污染物。兰雅茜^[92]的研究结果表明,当pH值在中性偏弱碱性(pH值7~9)时轮叶黑藻对Cd的去除效果较酸性条件下好。李光辉等^[93]研究发现,不同湿地植物水体pH与植株重金属积累量呈负相关关系,植物对废水中重金属的吸收富集能力在很大程度上取决于其根系分泌物对水体的酸化能力。而武坤^[94]研究发现,pH对人工湿地系统重金属污水的综合去除率表现为酸性(pH<6.5)>碱性(pH>7.5)>中性(6.5<pH<7.5),酸性环境中植物对Cu的富集能力最强,Cr、Cd和Pb在中性和碱性环境(pH>6.5)中更容易被植物富集。

5 展望

迄今为止,在植物水生态修复的相关报道中,研究较多的是水生植物对氮、磷等水体富营养化元素的吸收、净化情况,陆生植物净化水体污染物的试验方法及陆生植物对水体重金属去除的应用研究还有一定局限性,关于水生与陆生植物的净化污水机理、能力差异尚不明确。与水生植物相比,红树植物、陆生乔木和灌木生长期长、净化水持续时间长、景观营造更丰富,因死亡导致的二次污染少且易于管理,今后有必要加强针对红树植物、陆生植物系统及其与水生植物净化能力对比的研究,为构建复合多层次、多生境连续的净化能力强的植物生态修复系统提供指导。未来植物净化水体污染物的研究可从以下3个方面开展:一是探究红树植物和陆生乔木、灌木、草本植物在不同环境因素下对水体污染物的净化机制,改良净水装置与方法深入开展陆生植物对水体富营养化、重金属污染及复合污染的修复试验,加强

植物不同种类、不同生长阶段净化能力差异的比较研究,探明不同类型植物对水体污染物去除的最适条件;二是研究植物组合群落对水体污染物的联合去除作用,探寻多种水生与陆生植物的合理配置模式,深入了解不同植物群落配置对水体污染物的净化效能、富集特性及相互协同作用,并发挥植物-基质-微生物菌剂联合净化的配置模式;三是基于不同植物的吸附特性与净化作用,利用基因工程、遗传育种和材料改性技术,研究制备具有良好净化性能和重金属超积累能力的植物新材料、新品种。

参考文献:

- [1] 王莫茜. 多功能型壳聚糖基絮凝剂的制备及其相关应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.
- [2] 赵洁,徐宗学,刘星才,等. 辽河河流水体污染源解析[J]. 中国环境科学,2013,33(5):838-842.
- [3] 张兆海,常琦,张坤,等. 金堤河不同水期水体污染物时空变化特征分析[J]. 人民黄河,2023,45(8):101-106,113.
- [4] 张华兵,李玉凤,韩爽,等. 江苏盐城滨海湿地入海河流重金属污染的时空分布特征[J]. 环境污染与防治,2020,42(12):1491-1495.
- [5] 杨旭,王继富,万鲁河,等. 大庆典型区域湿地水体污染物迁移变化特征研究[J]. 生态环境学报,2013,22(5):806-809.
- [6] 郑卫国,栗春青,罗炳武,等. 11种陆生灌草植物对污水中氮磷的净化能力比较[J]. 广西林业科学,2024,53(5):649-657.
- [7] 张馨文,冯成业,张文智,等. 人工湿地碳调控研究进展[J]. 湿地科学,2022,20(3):413-420.
- [8] 赵文婧. 三种沉水植物去除水体氮磷与化感抑藻效果比较研究[D]. 杭州:杭州师范大学,2020.
- [9] 李娟,张伟,桑敏,等. 生物滞留设施对雨水径流氮磷污染物净化机理和运行优化方式研究进展[J]. 环境工程,2020,38(4):77-82,113.
- [10] 丁怡,唐海燕,宋新山,等. 调控碳氧水平促进人工湿地脱氮的研究进展[J]. 水处理技术,2019,45(6):19-22,32.
- [11] 郭亚平,吴晓芙,胡曰利. 湿地植物在城镇污水处理系统中的作用特性研究[J]. 环境科学与技术,2009,32(2):141-146.
- [12] 张志永,郑志伟,彭建华,等. 淡水环境下3种红树植物对氮磷的去除效应[J]. 水生态学杂志,2013,34(5):47-53.
- [13] 任文君,田在锋,宁国辉,等. 4种沉水植物对白洋淀富营养化水体净化效果的研究[J]. 生态环境学报,2011,20(2):345-352.
- [14] 隋然. 水生植物系统深度处理城镇污水的效能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
- [15] 林海,陶艳茹,董颖博,等. 基于妫水河水体水质净化的浮水植物优选[J]. 安全与环境学报,2019,19(5):1685-1694.
- [16] 王玮. 水生和陆生植物对污水中污染物的净化功能及其机理[D]. 南宁:广西大学,2019.
- [17] 陈照方,陈凯,杨司嘉. 水生植物对淡水生态系统的修复效果[J]. 分子植物育种,2019,17(13):4501-4506.
- [18] LU B, XU Z S, LI J G, et al. Removal of water nutrients by different aquatic plant species: an alternative way to remediate polluted rural rivers[J]. Ecological Engineering, 2018, 110:18-26.
- [19] 栗春青,郑卫国,韩梦梦,等. 11种水生植物的表面流人工湿地净化污水的效果研究[J]. 湖北林业科技,2024,53(3):8-14.
- [20] 李妙. 水生植物的净化作用及其在长沙市居住区水景中的应用研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2008.
- [21] 李银,夏先旭,曾凤,等. 鸢尾、翠芦莉和美人蕉对城市雨水污染的净化效果[J]. 热带农业科学,2020,40(6):90-95.
- [22] 王春景. 菖蒲和菹草对污染水体净化和修复效果的研究[D]. 芜湖:安徽师范大学,2006.
- [23] 刘雯,崔理华,黄细花,等. 垂直流人工花卉湿地模拟系统净化污水的效果[J]. 环境污染治理技术与设备,2006(9):111-114.
- [24] YANG J Z, QI Y, LI H Y, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus purification effects of different wetland plants on eutrophic water[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science, 2018, 113:012042.
- [25] 梁继满. 三种红树植物对海水池塘养殖尾水中氮的去除效率及影响分析[D]. 大连:大连海洋大学,2024.
- [26] 高锋,李晨. 红树林人工湿地处理含海水污水效果研究[J]. 浙江海洋学院学报,2013,32(5):426-429.
- [27] 许铭宇,刘雯,余土元,等. 水生木本植物净水效应研究[J]. 北方园艺,2018(5):123-129.
- [28] 杨波,汤洁,李海毅,等. 六种北方乔木植物净化污水效果研究[J]. 北方园艺,2014(22):62-65.
- [29] 秦登,唐旭栋,钟晴,等. 5种木本植物对富营养化水体的净化效果[J]. 浙江农业科学,2016,57(9):1429-1431.
- [30] 王红玲,王瑞刚,施士争,等. 柳林污水处理系统净化效率研究[J]. 江苏林业科技,2015,42(4):5-10.
- [31] 简向阳,冯承婷,甘美娜,等. 华南几种草本植物的水质净化能力研究[J]. 华北水利水电大学学报,2018,39(4):61-66.
- [32] 张美,袁玲,陆婷婷,等. 雨水生态处理措施中陆生植物净化能力研究[J]. 中国农学通报,2014,30(16):131-138.
- [33] 孟春,石贤爱,陈剑锋,等. 陆生植物蔬菜用于有机废水的生态治理研究[J]. 中国生态农业学报,2007,15(5):160-162.
- [34] 陆萍. 几种植物对含Mn生活污水的净化效果及其优势植物的筛选研究[D]. 南宁:广西大学,2007.
- [35] 付凌,胡春宏. 潜流人工湿地对污染物去除率的正交实验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2014,12(4):358-365.
- [36] 翟旭. HRT和污水浓度对不同植物人工湿地系统净化效果的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [37] 秦蕾蕾,李嘉,李春玲,等. 3种沉水植物对不同浓度生活污水净化效果试验研究[J]. 四川大学学报,2013,45(增刊):96-101.
- [38] 吴月燕,吴秋峰,曾华军. 富营养化水体中水生植物的生态和生理生化效应[J]. 浙江大学学报,2009,35(3):337-344.
- [39] 沙昊雷,寿佳晨,蔡鲁祥,等. 三种水生植物对黑臭河水的净化效果研究[J]. 四川环境,2016,35(4):17-21.

- [40] 胡绵好,施练东,朱建坤,等. 植物-浮床触生藻类对富营养化水体氮磷去除的协同效果[J]. 农业环境科学学报,2008,27(3):1090-1097.
- [41] 张志敏,朱祥,丁新泉,等. 几种水生植物净化城市污水能力比较研究[J]. 陕西林业科技,2016,44(6):5-9.
- [42] 罗德华. 红树植物人工湿地处理生活污水的净化效应及其机理研究[D]. 广州:中山大学,2005.
- [43] 李晓菊. 木本植物人工湿地对生活污水的净化效果及机理研究[D]. 广州:华南师范大学,2006.
- [44] 靖元孝,李晓菊,杨丹菁,等. 红树植物人工湿地对生活污水的净化效果[J]. 生态学报,2007,27(6):2365-2374.
- [45] 靖元孝,杨丹菁,任延丽,等. 水翁(*Cleistocalyx operculatus*)在人工湿地的生长特性及对污染物的去除效果[J]. 环境科学研究,2005,18(1):9-12,84.
- [46] GANI A, HUSSAIN A, PATHAK S, et al. An empirical investigation on the elimination of heavy metals using bioremediation method for selected plant species [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2024, 134: 103568.
- [47] 孟格蕾,邵志娟,邓纪凤,等. 重金属污染对植物的影响及植物修复技术[J]. 应用技术学报,2018,18(2):118-123.
- [48] 李晶,栾亚宁,孙向阳,等. 水生植物修复重金属污染水体研究进展[J]. 世界林业研究,2015,28(2):31-35.
- [49] TIWARI S, ULLAH A, FENG Y X, et al. Exploring plant symbiotic microbial dynamics in metal hyperaccumulators for phytoremediation[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2025, 196:105941.
- [50] 蒋雪,温超,曹珊珊,等. 重金属污染水体植物修复研究进展[J]. 应用化工,2016,45(10):1982-1985,1990.
- [51] 林海,陈思,董颖博,等. 黑藻、狐尾藻对重金属铅、镉、铬、钒污染水体的修复[J]. 中国有色金属学报,2017,27(1):178-186.
- [52] PENG K J, LUO C L, LOU L Q, et al. Bioaccumulation of heavy metals by the aquatic plants *Potamogeton pectinatus* L. and *Potamogeton malaianus* Miq. and their potential use for contamination indicators and in wastewater treatment [J]. Science of the Total Environment, 2008, 392(1):22-29.
- [53] 施沁璇,孙博烽,胡晓波,等. 水生植物对养殖池塘重金属污染底泥的修复作用[J]. 安全与环境学报,2018,18(5):1956-1962.
- [54] 张饮江,易冕,王聪,等. 3种沉水植物对水体重金属镉去除效果的实验研究[J]. 上海海洋大学学报,2012,21(5):784-793.
- [55] 马征. 重金属污染底泥植物修复技术研究[D]. 济南:山东建筑大学,2015.
- [56] 李金辉,丁薇,翁贵英,等. 明湖国家湿地公园10种水生植物的重金属富集特征[J]. 水生态学杂志,2020,41(1):86-91.
- [57] 孔皓. 上海市中小河道水生植物组织氮磷重金属含量与环境因子关系的研究[D]. 上海:上海海洋大学,2017.
- [58] 田功太,段登选,杜兴华,等. 凤眼莲、大藻对水体重金属复合污染的富集及去除效果研究[J]. 长江大学学报,2014,11(11):54-59,7-8.
- [59] 黄永杰,刘登义,王友保,等. 八种水生植物对重金属富集能力的比较研究[J]. 生态学杂志,2006,25(5):541-545.
- [60] 王琳瑀. 禾叶慈姑(*Sagittaria graminea*)对镉胁迫的响应[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [61] 黄勤超. 利用睡莲、荷花对黑臭河道底泥中PAHs和重金属的修复研究[D]. 上海:华东师范大学,2013.
- [62] 史一鸣,王文垅,陈少华,等. 西伯利亚鸢尾人工湿地对镉污染河水的净化研究[J]. 环境工程,2016,34(1):21-24.
- [63] 王敏,唐景春,王斐. 常见水生植物对富营养化和重金属复合污染水体的修复效果研究[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):50-56.
- [64] 李柳强. 中国红树林湿地重金属污染研究[D]. 厦门:厦门大学,2008.
- [65] 曾祥云. 海南东寨港红树林湿地水生生态系统健康评价研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.
- [66] 解检清. 六种园林植物及其组合吸收水体中Cd的效应研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2018.
- [67] 常会庆,徐晓峰,王世华,等. 几种植物对城市尾水中重金属的去除效果研究[J]. 河南农业科学,2012,41(10):89-93.
- [68] 潘霞,叶舒帆,郑晓茶,等. 4种植物组合对富营养化和重金属复合污染水体的净化效果[J]. 环境工程,2023,41(7):69-75.
- [69] SCHÜCK M, GREGER M. Salinity and temperature influence removal levels of heavy metals and chloride from water by wetland plants[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(20):58030-58040.
- [70] 牛之欣,孙丽娜,孙铁珩. 水培条件下四种植物对Cd、Pb富集特征[J]. 生态学杂志,2010,29(2):261-268.
- [71] 靳省飞. 植物材料对猪粪污水中污染物的絮凝及重金属的富集效果研究[D]. 石河子:石河子大学,2019.
- [72] 侯静. 重金属抗性花卉筛选及牵牛对镉、铬、汞积累特性的研究[D]. 大连:辽宁师范大学,2012.
- [73] 孙翔. 六种水生植物对水体重金属的净化能力研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2020.
- [74] 史永富,詹倩云,张龙飞,等. 植物修复中代表性浮水植物去除重金属的能力和特性比较[J]. 生态毒理学报,2022,17(3):316-325.
- [75] 高军侠,陶贺,党宏斌,等. 睡莲、梭鱼草对铜污染水体的修复效果研究[J]. 地球与环境,2016,44(1):96-102.
- [76] 方伟成,孙成访. 水生植物对低浓度铜离子净化效果的比较[J]. 安徽化工,2016,42(4):86-87.
- [77] 刘晶晶. 模拟人工湿地系统处理酸性重金属废水的效能及机理研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2010.
- [78] 张丽玲,于瑞莲,胡恭任,等. 泉州湾红树植物中重金属元素的分布与储量[J]. 环境科学与技术,2013,36(6):183-190.
- [79] 李海婷. 水培条件下绿萝对Cu、Cr富集实验研究[D]. 廊坊:防灾科技学院,2016.
- [80] 叶美金,刘艳玉,杨玉敏,等. 三种水培植物在重金属锰胁迫下的生长、吸收及富集作用研究[J]. 成都师范学院学报,2020,36(11):103-113.
- [81] RAI P K, TRIPATHI B D. Comparative assessment of *Azolla pin-*

- nata* and *Vallisneria spiralis* in Hg removal from G. B. Pant Sagar of Singrauli Industrial region, India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 148(1/2/3/4):75-84.
- [82] 赵丹慧,李琦,王清波,等. 种植 4 种植物的模拟人工湿地对污水中 4 种重金属的去除效果[J]. *湿地科学*, 2019, 17(2):255-260.
- [83] 伍清新,刘杰,靳振江,等. 李氏禾人工湿地净化 Cr(VI) 污染水体的性能研究[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(2):536-540.
- [84] 赵小红,傅滢,郭瑀,等. 桂溪河上游河段净水植物筛选和去污能力比较[J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(8):1101-1107.
- [85] 黄海平,谢从新,何绪刚,等. 密度和收割对水蓼菜净水效果的影响[J]. *渔业现代化*, 2012, 39(1):22-26, 39.
- [86] 苏倩. 穗花狐尾藻和菹齿眼子菜氮磷积累量特征及净水功能[D]. 保定:河北大学, 2013.
- [87] 马明海,罗毅,陈然,等. 4 种水生植物腐解对人工湿地净化水西河的影响[J]. *环境保护科学*, 2022, 48(6):116-120.
- [88] 刘子琪,王芳,王爱丽. 沉水植物菹草改性后对 Cr(VI) 的吸附研究[J]. *工业水处理*, 2019, 39(3):38-41.
- [89] 王烽圣,许晓毅,时和敏,等. Fe²⁺ 改性菹蒲生物炭制备及对水中磷的吸附特性[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(11):3493-3503.
- [90] 李光辉,何长欢,刘建国. 不同湿地植物的根系泌氧作用与重金属吸收[J]. *水资源保护*, 2010, 26(1):17-20.
- [91] YAMAMOTO A, EGUCHI H, SODA S. Removal of reactive yellow 86 from synthetic wastewater in lab-scale constructed wetlands planted with cattail and *Papyrus* [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(15):6584.
- [92] 兰雅茜. 稀土镧影响两种植物对水体中重金属镉去除效果的研究[D]. 成都:四川农业大学, 2016.
- [93] 李光辉,杨霞,徐加宽,等. 不同湿地植物的根系酸化作用与重金属吸收[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(1):97-100.
- [94] 武坤. 人工湿地系统重金属污水去除效果的整合分析[D]. 镇江:江苏大学, 2022.

(责任编辑:黄克玲)