

人工湿地中植物对污染物去除机理研究进展

龚深¹, 巢传鑫², 邹冬生¹, 谢永宏^{2*}

(1. 湖南农业大学环境与生态学院, 湖南长沙410128; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南长沙410125)

摘要:人工湿地系统具有处理效果好、成本低等优点,被广泛应用于污水处理中,其中水生植物在处理过程中起着不可替代的重要作用。综述了人工湿地水生植物类别、污染物去除一般机理以及典型污染物和重金属的去除机理,分析了植物转化机理、根系分泌物及其环境响应机理、叶片挥发机理、污染物储存机理以及生物膜过滤机理的适用条件和去除效果。最后,对应用湿地植物去除水体污染物过程中存在的问题进行了探讨,以期为人工湿地植物生态修复技术的发展和應用提供参考。

关键词:去除机理;水生植物;污染物;人工湿地

中图分类号:Q149 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-5948(2023)06-927-09

人工湿地是进行生态工程水污染控制和处理的重要技术之一,作为处理主体的水生植物,由于投资低、易管理、污染物去除效率高等优点而被广泛应用于工业、农业和生活用水的处理^[1-3]。对比常规的物理化学方法,水生植物对污染物的去除多利用本身的代谢过程以及由代谢所引起根系微环境、湿地基质等的变化所产生的一系列正效应协同对污染物进行去除。

国内外学者对植物修复机理进行了广泛的研究和分析,但很少有研究对植物的单一机理进行全面的分析。在综述人工湿地植物类别以及污染物去除机理的基础上,讨论了植物处理污染物方面的最新研究进展,以期为人工湿地的污染物治理以及制定科学合理的修复方案提供理论依据和技术支持。

1 人工湿地系统中的水生植物群落

人工湿地模仿自然湿地建造而成,其利用物理、化学和生物过程的协同作用来净化水体。一般由水生植物、附着生物膜和人工基质组成一个独特的植物-微生物-土壤生态系统,其中,水生植物群落作为人工湿地生态系统的重要组成部分,

对人工湿地内物质循环和能量流动具有重要作用。根据水生植物与生长基质相关的生长形式,人工湿地生态系统中的水生植物群落可以分为沉水植物群落、浮叶植物群落和挺水植物群落^[4]。

1.1 沉水植物

1.1.1 生长特性

沉水植物是构成人工湿地生态系统的重要组成部分^[5]。沉水植物需要沉没于水中完成生活史,其通过光合作用产生的氧气都释放到水中,可以显著增加水体中的溶解氧含量^[6],甚至导致富氧状态,进而抑制厌氧菌的存活,防止水体变质,可以有效保护水体的生态平衡^[7]。此外,沉水植物还可以通过根从沉积物或水体中吸收金属和类金属^[8]。

1.1.2 化感特性

自然界中的很多沉水植物都可以释放出具有抑制藻类生长的化感物质^[9],化感物质可以使藻类细胞的生理过程产生变化,例如,影响体内酶的活性,加快有毒物质在体内的积累速率,导致藻类生物量减小^[10]。但是,不同沉水植物分泌的化感物质对藻类的作用不同,例如,穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)可以释放4种多酚物质,抑制蓝藻的光系统活性,特别是PS II光系统,通过

收稿日期:2023-02-19;修订日期:2023-10-31

基金项目:湖南省-国家基金委联合基金重点项目(U21A2009)、湖泊与环境国家重点实验室开放基金项目(2022SKL012)和湖南重点研发项目(2022SK2088)资助。

作者简介:龚深(1998—),男,湖南省长沙人,硕士研究生,主要从事湿地植物生态研究。E-mail: 627260458@qq.com

通讯作者:谢永宏,研究员。E-mail: yonghongxie@163.com

降低蓝藻代谢的方式抑制其生长^[11];从菹草(*Potamogeton crispus*)与铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)共同培养实验中发现,化感物质可以抑制叶绿素的合成,从而抑制铜绿微囊藻的生长^[12]。当蓝藻(*Cyanobacteria*)与沉水植物共存时,蓝藻对化感物质更敏感,生物量明显减小,使沉水植物成为控制蓝藻水华的有效工具^[13]。

1.2 浮叶植物

1.2.1 生长特性

浮叶植物同样是人工湿地生态系统中主要的植物种类之一,在水域中覆盖面积广,根系可以直接吸收水中的污染物和有害物质。浮叶植物叶片漂浮于水面,在自身进行光合作用的同时,可以通过遮阴作用抑制浮游植物的光合作用。在利用大藻(*Pistia stratiotes*)改善富营养水体时发现,大藻能降低水体浊度、盐度和悬浮物含量,有效地改善水体环境^[14];对凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)净化水体的研究发现,2周后凤眼莲的生物量增大约40%,水体中总氮、总磷、硝酸盐、磷酸盐和化学需氧量浓度都减小了65%~80%^[15];利用大藻和紫萍(*Spirodela polyrhiza*)等浮叶植物对6种重金属进行处理时发现,除了紫萍对铬的去除率只有33.88%外,其他处理对重金属的去除率都大于80%^[16]。值得注意的是,大藻和凤眼莲是世界上普遍的入侵水生维管植物,具有快速生长和适应不同水体的特点,其作为r-对策者,能在污水中快速吸收养分,通过扩大种群数量迅速发挥作用。除了可以利用浮叶植物降低水体富营养化程度、提高水体透明度以及去除藻类外,还可以利用浮叶植物漂浮的生长特性,弥补沉水植物无法在富营养和透明度不高的水体中生存的缺陷,将浮叶植物对污染物的去除作用作为恢复或构建沉水植物群落的前置环节加以运用。

1.2.2 遮阴特性

由于浮叶植物叶片漂浮于水面,对藻类等浮游植物具有较强的遮阴作用,可以通过竞争光照的方式,使水体中的藻类等浮游植物逐渐死亡,藻类等浮游植物腐烂时消耗大量氧气,使水体呈厌氧状态,加速反硝化过程,有利于水体中氮的去除。除了通过遮阴抑制浮游植物生长,浮叶植物根系同样会释放出化感物质,抑制藻类生长。凤眼莲根系分泌物可以在短时间内使栅藻

(*Scenedesmus*)的超氧化物歧化酶活性下降,导致活性氧收支失衡,活性氧积累过量,最终导致其死亡^[17],从而起到净化水体的作用。

1.3 挺水植物

1.3.1 生长特性

挺水植物在人工湿地生态系统中的使用最广泛。挺水植物的根生长在底泥中,而茎、叶挺出水面,常分布于湿地边缘的浅水地带。较大的生物量,以及较高的氮、磷积累量使其对水体中氮、磷元素吸收能力较大,挺水植物具有较好的污染物处理效果。在不同季节,采用风车草(*Cyperus involucratus*)和再力花(*Thalia dealbata*)两种挺水植物的组合,对水体中总磷的去除率都比苦草(*Vallisneria spiralis*)和黑藻(*Hydrilla verticillata*)的处理高出10%^[18];在表面流人工湿地处理生态系统中,挺水植物芦苇(*Phragmites communis*)、香蒲(*Typha orientalis*)和菖蒲(*Acorus calamus*)对氨氮、硝态氮、总氮和总磷的去除率分别比沉水植物伊乐藻(*Elodea canadensis*)和浮叶植物睡莲(*Nymphaea tetragona*)高10%、20%、15%和30%^[19]。在水淹条件下,挺水植物茎叶部分所产生氧气通过通气组织释放到根部,从而改变根系微环境的氧化还原条件,使根系细菌硝化和反硝化活性提高,促进污染物的吸收和利用。

1.3.2 富集特性

挺水植物可以将不能分解的污染物富集在体内,并通过收割的方式将污染物彻底带离水体或者土壤,达到去除污染物的目的。研究表明,收割挺水植物对湿地土壤中总氮、总磷的去除率分别为40%和35.7%,高于未收割植物的人工湿地对总氮、总磷的去除率(34.6%和29.1%)^[20];通过对8种挺水植物的收割发现,收割挺水植物可以促进水体的净化,使水质提高1~2个等级,但是单次收割对水质的影响不显著,因此可以采用多次收割的方式提高污染物去除量^[21]。在对植物中挥发性污染物富集情况进行调查时发现,相较于挺水植物,沉水植物中能检测到浓度的目标污染物含量明显更大^[22]。

2 污染物去除机理

2.1 植物的降解转化机理

2.1.1 植物的吸收作用

植物的主动吸收作用是植物在生长过程中具

备的一项基本生理功能。在吸收过程中,植物除了吸收自身所需要的各项营养物质外,还会将水体或者土壤中的污染物质一起吸收到植物体内,因此,植物的吸收作用是植物净化过程中的关键环节。

2.1.2 植物的降解作用

植物吸收污染物后,可以利用体内的化学物质,通过改变污染物形态的方式,降低污染物的毒性和利用度等。研究发现,植物可以吸收土壤中的阿特拉津,并降解为毒性比母体低许多的脱乙基阿特拉津、羟基阿特拉津和脱异丙基阿特拉津^[23];沉水植物金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)可以利用体内的过氧化物酶和多酚氧化酶将水体中的双酚A降解为对斑马鱼无致死性的降解产物4-异丙烯基苯酚^[24]。

2.1.3 降解产物

污染物的降解产物可以分为可吸收降解产物和不可吸收降解产物。其中,可吸收降解产物一般与氮、磷等营养元素有关,例如,植物在吸收硝态氮后,会在根、茎、叶中通过硝酸盐转运蛋白、供氢体和硝酸还原酶的共同作用被还原为氨氮,从而被植物利用^[25]。不可吸收降解产物则与重金属有关,当重金属转运到植物体内后,植物体产生的植物螯合肽、有机酸和金属硫蛋白等物质与重金属发生螯合沉淀等作用后,形成毒性低、流动性弱的代谢物^[26]。不可吸收降解产物不能被植物吸收,而是通过运输作用被输送到细胞壁和液泡等代谢不活跃的区域或者亚细胞结构中储存起来^[27]。

2.1.4 植物的转化作用

植物的转化是指植物将污染物或降解产物转化为自身生物量的过程,这也是利用植物去除污染物最传统的方式,通常用于富含营养元素的水体或土壤。利用植物的吸收作用,吸收水体或土壤中的营养元素,在富营养水体中通过竞争营养元素的方式,抑制浮游生物的繁殖和生长,因此植物转化的方式在富营养水体的处理中更常见。以氮元素为例,研究发现,植物通过吸收后转化的方式脱氮率只有11.3%^[28],但是也有研究表明,其脱氮率可以达到50%以上^[29],这是由于不同植物对氮元素的需求不同,导致植物脱氮率差异较大。有研究对植物去除污染物时植物的生长指标进行测试发现,光合速率与污染物去除率的相关系数显

著高于其他生长指标,尤其是对氮元素的去除^[30],其原因可能是植物吸收水体中的氮元素,促进了叶绿素的合成,进一步提高了光合速率。

植物的吸收、降解和转化是一个连续的过程,本研究将此过程分开分析,以展现植物对污染物的降解机理,但是在实际情况下,需要综合考虑目标植物的特性,以取得最好的处理效果。

2.2 植物根系分泌物及环境响应机理

2.2.1 根系微环境

根系微环境是指由植物根系、土壤和微生物构成^[31],受植物根系活动影响,贴近植物根系的区域,是植物与土壤之间物质交换频繁的界面,同时此区域中土壤微生物活动非常活跃^[32]。植物根系除了进行物质交换外,还可以通过与周边环境联动产生的正效应,对污染物进行降解。

2.2.2 根系分泌物

根系分泌物是指植物根系向周围环境中释放多种化合物的总称。根系分泌物成分复杂,包括烷烃、烯烃、酯、胺、醇、酚、酮、有机酸、糖类和脂肪等化合物^[33]。其中,糖类和脂肪酸等物质给微生物提供了营养物质,为微生物的繁殖创造了条件。此外,植物可以通过调控根系分泌物的方式来适应环境,如宽叶香蒲(*Typha latifolia*)面对铜胁迫时,草酸的分泌量会在一定时间内显著增大^[34]。

根系分泌物中的有机酸和氨基酸等天然配体,可以与重金属发生络合或螯合作用,形成的可溶性络合物,生物有效性提高,进而增强植物对重金属的吸收效率。螯合作用则形成不易被植物所吸收的螯合物,固定于土壤中,降低了重金属的迁移能力,减小重金属对植物的胁迫^[35]。此外,根系分泌物具有化感作用,能够抑制根系周边植物生长,间接提高水体透明度和溶解氧含量。

2.2.3 泌氧现象

水生植物积极响应淹水带来的缺氧环境,会出现泌氧现象。研究表明,水生植物在淹没条件下的泌氧率较非淹没条件下提高了52.2%~379.0%^[36]。水生植物具有发达的通气组织,有利于氧气从地上部分输送到植物根部,这些氧气除了满足根的有氧呼吸外,其中一部分会通过根尖以及根毛渗透到根际土壤中,改变根系周边的氧化还原电位。当植物根部泌氧作用加强,导致其根际氧化还原电位增大,pH增大,重金属的生物

有效性增加^[37],植物吸收重金属能力增强;水生植物根系泌氧作用减弱,有助于根际保持适度还原条件,此时重金属的有效性降低,使重金属固定在土壤中。此外,泌氧现象能使植物根系环境呈连续的好氧、缺氧和兼氧状态,根系微环境中好氧菌和兼氧菌的种群密度显著增大,在水淹状态下使硝化作用和反硝化作用同时进行^[38]。研究表明,植物根系泌氧速率与氮、磷和化学需氧量的去除率正相关^[39],因此适当强化植物的泌氧作用可以提高植物对污染物的去除率。

2.2.4 铁膜作用

当植物泌氧作用增强时,其根系表面会形成铁氧化物胶膜,简称为铁膜^[40]。铁膜的形成被认为是根表面氧化铁沉淀、植物氧损失和微生物的生物氧化共同作用的结果^[41]。铁膜作为植株受到胁迫时所产生的保护机理,能够吸附周围的重金属,降低重金属的流动性。当水稻(*Oryza sativa*)根须泌氧作用加强时,有利于形成更多的铁膜,进而使铁膜中富集更多的重金属^[42]。此外,研究还发现,铁膜的存在可以促进根系对氮和磷污染物的去除,原因可能是铁膜改变了根系周边微环境,促进了氮和磷代谢细菌的生长,从而改变植物根系周围的微生物群落结构,进一步加强了根系对氮和磷元素的吸收。但是也有研究表明,过厚的铁膜会阻碍植物根系对营养物质的吸收^[43]。

2.3 植物叶片挥发机理

2.3.1 叶片挥发作用

植物吸收污染物后,通过体内生物酶转化以及其他特殊代谢途径,将污染物转化为毒性小、容易挥发的形态,最后通过植物的蒸腾作用,从叶片气孔排放到大气中。这种形式一般挥发的速率非常慢,周围的空气质量不会受到太大影响,且植物蒸腾速率会影响植物挥发的效果^[44]。

植物叶片挥发作用受到植物类型和污染物类型的限制,多数水生植物不具有将污染物进行降解并挥发的能力。此外,通过挥发排放的重金属污染物最终会通过降水等方式回到水体或土壤中,使这种修复方法的处理效果差异较大。

2.3.2 抗坏血酸氧化还原作用

抗坏血酸是植物体中重要的小分子抗氧化剂,其对植物的生长代谢、光合作用和抗氧化作用等生理过程具有十分重要的影响^[45]。抗坏血酸的

还原性对污染物具有一定作用,研究发现,抗坏血酸可以促进植物对重金属汞的挥发,其原理可能为抗坏血酸还原成单脱氢抗坏血酸,脱出的单电子与汞离子相互耦合,使汞离子转化为气态汞,通过蒸腾作用从叶片挥发^[46]。此外,抗坏血酸的合成速率会随着光照强度增强而增大^[47],合成速率增大,抗坏血酸循环代谢能力随之增强,促进汞离子与单电子的耦合,加快汞离子的挥发。

2.4 污染物储存机理

2.4.1 植物储存原理

植物将污染物储存在体内,是一种缓慢的、不可逆的封存过程,也是一种生物积蓄过程,通过一段时间的积累后,采用人工收割植物的方式可以彻底去除污染物。这种方式多应用于对重金属等无机污染物的去除。有机污染物在进入植物体时,可以被降解成更小的产物从而被植物吸收,而重金属等无法被降解和吸收,只能改变其价态,保存在植物体内,因此,需要在植物叶片掉落或者植物体死亡之前,对植物进行收割,否则污染物会随着落叶和植物残体重新回到土壤或水体中,造成二次污染。

2.4.2 植物收割及其伴生效应

污染物在植物不同组织中富集的程度存在差异,有针对性地对植物进行收割,可以达到效益最大化。研究表明,锌主要富集在植物地下部分,而锰主要富集在植物地上部分^[48]。植物除了吸收生长所需要的氮、磷等养分外,多余的养分同样会富集在茎、叶中,芦苇等挺水植物地上部分所富集的氮、磷含量显著大于地下部分,因此对植物地上部分进行收割可以去除大部分的污染物^[49]。但是也有研究表明,短时间内多次收割会降低植株对氮、磷元素的吸收效率^[50]。根据植物的生长特性选择收割时间十分重要,例如,香蒲的最佳收割时间为10月下旬至11月中旬^[51]。

植物收割除了能去除污染物,还具有许多有益的伴生效应。研究表明,对植物进行收割还可以拓展植物的生长空间,使光照更加充足,进而加快植物新陈代谢的速率,促进地上、地下生物量的积累,同时刺激根际微生物活动^[52]。

2.4.3 超积累现象

自然界中存在一类植物,其污染物积累量往往是普通植物的几十倍甚至上百倍,称之为超积累植

物。宽叶香蒲根系对铅、锌和铁的积累量可以分别达到1 352 mg/kg、963.73 mg/kg和9 565.27 mg/kg^[53]；研究发现，当锰的浓度为15 000 $\mu\text{mol/L}$ 时，水蓼(*Persicaria hydropiper*)的叶、根和茎中锰积累量分别达到24 447.17 mg/kg、11 574.47 mg/kg和10 343.52 mg/kg^[54]。

2.5 植物生物膜过滤机理

2.5.1 生物膜性质

生物膜是由许多分散的群落、不溶性固体颗粒和水等物质构成的具有流变性质的异质薄膜^[55]，不均匀分布在载体表面，且一般为多孔结构，具有很强的吸附能力。在自然条件下，生物膜可以附着生长在所有接近水体或淹没于水体的固体表面，包括植物植株、植物根系和基质等。生物膜在水处理中的功能包括生物累积、生物强化、生物矿化、生物降解和生物吸附等，而生物膜的结构是决定其功能的重要因素^[56]。

2.5.2 生物膜结构

生物膜结构可分为物理结构和微生物群落结构。物理结构是指生物膜的横向结构，由内到外一般可以分为厌氧层、兼氧层和好氧层。在生物膜成膜过程初期，部分微生物和丝状物质被截留在植物表面，并迅速生长，逐渐覆盖整个植物表面并逐渐增厚，随着生物膜的厚度不断增大，其物理结构逐渐发生变化。生物膜增厚导致氧气的传递受限，使生物膜表层呈好氧状态，生长好氧微生物和兼氧微生物，而生物膜内侧则处于厌氧状态并生长厌氧菌，可以同时进行硝化和反硝化作用，对污染物进行去除，达到净化水体的效果。生物膜的微生物群落结构是指生物膜中微生物群落的组成和丰度，其群落组成取决于废水特点、污染物特点、水生植物等因素。不同微生物在人工湿地中发挥不同的作用。氨化作用主要由噬几丁质菌(*Chitinophaga*)、白蚁菌(*Isoptericola*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)和中华根瘤菌(*Sinorhizobium*)参与完成，而变形菌(*Proteobacteria*)、拟杆菌(*Bacteroidetes*)、厚壁菌(*Firmicutes*)和放线菌(*Actinobacteria*)则与反硝化作用有关^[57]。当环境条件变化时，植物生物膜上的微生物群落能积极响应并适应，研究表明，硝酸盐负荷会刺激狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)附着生物膜中反硝化细菌的生长及反硝化基因丰度的增加^[58]。此外，微生物群落丰度

对处理效率也有影响，研究发现，当除氮的相关微生物丰度增大时，水体中的总氮、硝态氮和氨氮等的去除率也有所上升^[59]。因此，生物膜中微生物群落的组成和丰度对污染去除具有重要作用。

2.5.3 胞外聚合物作用

生物膜上的微生物能够分泌胞外聚合物，其是由微生物的分泌物、细胞裂解物和大分子水解产物以及吸附的有机物所组成的多聚物^[60]。胞外聚合物中含有大量活性和可电离的化学官能团，这些具有络合和配位能力的化学官能团能与重金属离子相互作用^[61]，降低重金属含量。研究发现，污泥中胞外聚合物含量越大，磷的积累量越大，表明胞外聚合物对磷具有一定的积累作用^[62]。

3 典型重金属元素特性及其去除机理

植物富集、泌氧和铁膜作用是人工湿地生态系统中普遍的去重金属污染的3种方式。其中，植物富集重金属后进行收割的方式处理效果最佳，且收割后产物易处理、经济效益高，因此被广泛应用。

3.1 汞元素的特性及其去除机理

汞具有持久性、易迁移性、高生物富集性和高生物毒性等特性，汞的存在形态分为离子吸附态汞、共价吸附态汞、可溶性汞、难溶性汞和有机态汞，其中有机态汞毒性最强，且可以在大气和食物链中长期存在。

植物可以吸收汞，经体内酶的转化，从叶片挥发至大气中，但挥发后的汞随着空气流传播，可能随降水再次返回水中，造成二次污染。植物富集作用可以将汞元素固定在植物体内，植物吸收汞后，多积累在体内，然后进行收割，可以大大降低二次污染的风险。

植物差异和汞富集特性的差异，使不同植物对汞的吸收量不同。在3种不同浓度下，再力花对总汞、颗粒汞和溶解性汞的去除率都大于80%^[63]。研究表明，微生物也可以将二价汞储存在体内^[64]。甲烷菌(*Methylomonas* sp.EFPC3、*Methylosinus trichosporium* OB3b和*Methylococcus capsulatus* Bath)能够在24 h内可以将80%~95%的甲基汞吸收^[65]。

3.2 镉元素的特性及其去除机理

镉是具有毒性的重金属污染物，其存在形态

分为水溶性镉和非水溶性镉。其中,水溶性的离子态镉和络合态镉,具有易迁移的特点且可以被植物吸收,非水溶性的镉化合物(镉沉淀物、吸附态镉)则稳定性较强,不易迁移和被植物吸收。镉具有一定生物毒性,当镉在植物组织中的含量达到一定浓度时,会使植物代谢紊乱,蛋白质、糖类和叶绿素的合成受阻,最终导致植物死亡^[66]。

植物可以通过细胞壁与镉结合、根系分泌物和镉螯合、根系分泌物限制镉运输等方式,控制镉在植物体的积累和运输^[67]。利用镉耐受优势植物高度富集镉的特性,可以高效去除水体中的镉污染物,例如,利用浮萍(*Lemna minor*)去除水中的镉元素,结果显示浮萍可以去除水体中70%的镉元素^[68]。

根系微生物可以改善植物生长或增强植物的镉积累能力,来促进植物对镉的吸收。根系微生物可以加快可溶性镉向根系转运,并通过分泌有机酸降低土壤pH,促进土壤中生物可利用度低的镉元素溶解^[69]。微生物在自身生长过程中产生的氨基酸、蛋白质和多肽等物质,与镉元素发生螯合反应,促进镉元素的溶解和吸附,通过氧化还原和生物矿化等作用改变镉元素的化学形态,降低其毒性^[70]。

在人工湿地生态系统中,基质对镉元素的去除也有很大作用。基质含有丰富的胶体、孔隙和广泛的生物膜,可以截留水体中镉元素,使之与基质表面的黏土颗粒和生物膜相互作用,吸附在基质和生物膜上,达到去除目的。

4 存在的问题和展望

目前,人工湿地已经在国内外得到广泛应用,取得了较理想的效果,成为污水处理的主要工艺之一。但从实际运用来看,在以水生植物作为处理主体时还存在许多不足之处。

各种处理机理的关系及贡献不明确。植物在处理污水的过程中都是多机理协调进行,被视为一个连续的过程。植物对污染物进行吸收的同时,周边微生物和根系分泌物会对污染物进行作用,最终的处理效果为多种机理协同作用的结果,无法得知各种处理机理贡献大小及其之间的关系。因此,需要对不同机理进行分类研究,未来深入研究植物、根系、微生物、基质与净化效果之间

的关系,可以为人工湿地高效处理污水提供极大帮助。

植物种类选择问题。人工湿地植物种类的选择目前仍然存在一些问题,主要表现为可应用植物种类少、水生植物处理效果受环境影响大和水生植物可能存在二次污染问题。为了解决这些问题,首先,需要扩大植物的挑选范围,挑选出更多的适应性强、去污效果好的人工湿地植物。在人工湿地中,应用广泛且处理效果好的植物一般对污染物具有快速吸收的能力,相对容易快速生长和繁殖,并且具有一定对营养和环境变化的耐受性。在实际应用过程中,凤眼莲、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、大藻、粉绿狐尾藻等处理效果较好的入侵植物多被选用。相比于其他传统水生植物,入侵植物更具有耐受性且可以快速适应环境,在水处理过程中能迅速发挥作用,但是,入侵植物大量繁殖会导致水生生态系统生物多样性受到破坏,因此在实际应用中应该妥善管理,及时对过度繁殖的植物进行清理。其次,植物的处理效能会随着季节发生变化。冬季气温降低,植物代谢减缓,同时生物膜活性降低,部分植物出现萎缩的现象。植物体代谢降低导致植物吸收效率下降,植物体萎缩,使植物附着生物膜面积减少,进一步导致冬季人工湿地污水处理效率降低。因此,在植物配置时,需要考虑不同季节优势种的搭配。最后,水生植物在去除污染物时,其生物量会大大增加,重金属等污染物也作为增加生物量的一部分被储存在植物体内。当水生植物过量生长或者季节变化时,弱小植株死亡,导致污染物重回水体,因此,需要定期收割植物。

植物与微生物之间的协同作用研究有待加强。在人工湿地运行期间,植物和基质的作用可以通过实时监测数据反映出来,但是容易忽视附着的微生物在其中的作用。因此,可以加强对人工湿地内微生物的监测和相关研究。未来深入研究微生物与植物之间的相互作用机理,可以为提高和优化微生物-植物联合处理技术提供思路。

参考文献

- [1] MUSTAPHA H I, GUPTA P K, YADAV B K, *et al.* Performance evaluation of duplex constructed wetlands for the treatment of diesel contaminated wastewater[J]. *Chemosphere*, 2018, **205**(8):

- 166-177.
- [2]MA Y, ZHAI Y, ZHENG X, *et al.* Rural domestic wastewater treatment in constructed ditch wetlands: Effects of influent flow ratio distribution[J]. *Journal of cleaner production*, 2019, **225**(7/10): 350-358.
- [3]VASSILIKI A P, GEORGIOS D G, ZISIS V, *et al.* Treatment of agricultural equipment rinsing water containing a fungicide in pilot- scale horizontal subsurface flow constructed wetlands[J]. *Ecological engineering*, 2017, **101**: 193-200.
- [4]李峰平, 魏红阳, 马喆, 等. 人工湿地植物的选择及植物净化污水作用研究进展[J]. *湿地科学*, 2017, **15**(6): 849-854.
- [5]XQLA B, ZLHA B, JYWA B, *et al.* Removal of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in constructed wetlands: considerable contributions of submerged macrophytes and the microbial community[J]. *Water research*, 2021, **7**(1): 117080.
- [6]CHAO C, WANG L, LI Y, *et al.* Response of sediment and water microbial communities to submerged vegetations restoration in a shallow eutrophic lake[J]. *Science of the total environment*, 2021, **801**:149701.
- [7]THOMAZ S M. Ecosystem services provided by freshwater macrophytes[J]. *Hydrobiologia*, 2023, **850**(12/13): 2757-2777.
- [8]XING W, BAI G, WU H, *et al.* Effect of submerged macrophytes on metal and metalloid concentrations in sediments and water of the Yunnan plateau lakes in China[J]. *Journal of soils & sediments*, 2017, **17**(10): 1-10.
- [9]GROSS E M. Allelopathical interaction between submerged macrophytes epiphytes and phytoplankton Algaecide hydrolysis polyphenol from *Myriophyllum spicatum* L[D]. PhD Thesis Cuvillier: Kiel University, 1995.
- [10]杨凤娟, 蒋任飞, 饶伟民, 等. 沉水植物在富营养化浅水湖泊修复中的生态机理[J]. *安徽农业科学*, 2016, **44**(26): 58-61.
- [11]ZHU J, LIU B, JING W, *et al.* Study on the mechanism of allelopathic influence on cyanobacteria and chlorophytes by submerged macrophyte (*Myriophyllum spicatum*) and its secretion[J]. *Aquatic toxicology*, 2010, **98**(2): 196-203.
- [12]张欣, 卢学强, 李玉鑫, 等. 菹草对普通小球藻和铜绿微囊藻的化感作用[J]. *中国给水排水*, 2020, **36**(7): 68-73.
- [13]AMORIM C A, MOURA A. Effects of the manipulation of submerged macrophytes, large zooplankton, and nutrients on a cyanobacterial bloom: A mesocosm study in a tropical shallow reservoir[J]. *Environmental pollution*, 2020, **265**(B): 114997.
- [14]NAHAR K, HOQUE S. Phytoremediation to improve eutrophic ecosystem by the floating aquatic macrophyte, water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) at lab scale[J]. *Egyptian journal of aquatic research*, 2021, **47**(2): 231-237.
- [15]REZANIA S, DIN M, PONRAJ M, *et al.* Nutrient uptake and wastewater purification by *Water Hyacinth* and its effect on plant growth in a batch system[J]. *Journal of environmental treatment techniques*, 2013, **1**(2): 81-85.
- [16]MIRETZKY P, SARALEGUI A, CIRELLI. Aquatic macrophytes potential for the simultaneous removal of heavy metals (Buenos Aires, Argentina)[J]. *Chemosphere*, 2004, **57**(8): 997-1005.
- [17]杨小杰, 韩士群, 唐婉莹, 等. 凤眼莲对铜绿微囊藻生理、细胞结构及藻毒素释放与削减的影响[J]. *江苏农业学报*, 2016, **32**(2): 376-382.
- [18]范远红, 崔理华, 林运通, 等. 不同水生植物类型表面流人工湿地系统对污水厂尾水深度处理效果[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(6): 2875-2880.
- [19]俞波, 黄荣振, 何圣兵. 不同植物类型表面流湿地处理低污染河水的效能研究[C]//《环境工程》编委会, 工业建筑杂志社有限公司.《环境工程》2018年全国学术年会论文集(下册).《工业建筑》杂志社, 2018: 5.
- [20]赵梦云, 熊家晴, 郑于聪, 等. 植物收割对人工湿地中污染物去除的长期影响[J]. *水处理技术*, 2019, **45**(11): 112-116.
- [21]刘长娥, 付子轼, 周胜, 等. 水生植物收割管理对水质净化效果的影响[J]. *浙江农业科学*, 2022, **63**(3): 623-626.
- [22]FAN S R, LIU H, ZHENG G M, *et al.* Differences in phytoaccumulation of organic pollutants in freshwater submerged and emergent plants[J]. *Environmental pollution*, 2018, **241**(10): 247-253.
- [23]BURKEN J G, SCHNOOR J L. Phytoremediation: Plant uptake of atrazine and role of root exudates[J]. *Journal of environmental engineering*, 1996, **122**(11): 958-963.
- [24]张国森. 沉水植物金鱼藻对水中典型内分泌干扰物双酚A的降解机理研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2018.
- [25]段永康, 杨海燕, 吴文龙, 等. 植物氮素吸收、转运和同化的分子机制[J]. *福建农业学报*, 2022, **37**(4): 547-554.
- [26]薛欢, 刘志祥, 严明理. 植物超积累重金属的生理机制研究进展[J]. *生物资源*, 2019, **41**(4): 289-297.
- [27]DENG T H B, VAN DER ENT A, TANG Y T, *et al.* Nickel hyperaccumulation mechanisms : A review on the current state of knowledge[J]. *Plant soil*, 2018, **423**(1/2): 1-11.
- [28]熊家晴, 杜晨, 郑于聪, 等. 植物和基质级配水平流人工湿地处理污染河水的影响[J]. *工业水处理*, 2015, **35**(8): 22-25.
- [29]HUANG S M, ZHOU F L, ZHENG X Y, *et al.* Removal of ammonia nitrogen from black and odorous water by macrophytes based on laboratory microcosm experiments[J]. *Rsc advances*, 2023, **13**(5): 3173-3180.
- [30]CHENG X Y, LIANG M Q, CHEN W Y, *et al.* Growth and contaminant removal effect of several plants in constructed wetlands[J]. *Journal of integrative plant biology*, 2009, **51**(3): 325-335.
- [31]GONG X W, FENG Y, DANG K, *et al.* Linkages of microbial community structure and root exudates: Evidence from microbial nitrogen limitation in soils of crop families[J]. *Science of the total environment*, 2023, **881**: 163536.
- [32]吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J]. *植物生态学报*, 2014, **38**(3): 298-310.

- [33]武淑文, 侯磊, 刘云根, 等. 湿地植物香蒲根系抗氧化酶活性和根系分泌物对阿特拉津胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(12): 2751-2760.
- [34]LYUBENOVA L, KUHN A J, A HÖLTKEMEIER, *et al.* Root exudation pattern of *Typha latifolia* L. plants after copper exposure[J]. Plant and soil, 2013, **370**(1/2): 187-195.
- [35]ZHANG Y, HE S, ZHANG Z, *et al.* Glycine transformation induces repartition of cadmium and lead in soil constituents[J]. Environmental pollution, 2019, **251**: 930-937.
- [36]YANG J, ZHENG G, YANG J, *et al.* Phytoaccumulation of heavy metals (Pb, Zn, and Cd) by 10 wetland plant species under different hydrological regimes[J]. Ecological engineering, 2017, **107**: 56-64.
- [37]WANG Q, HU Y, XIE H, *et al.* Constructed wetlands: A review on the role of radial oxygen loss in the rhizosphere by macrophytes[J]. Water, 2018, **10**(6): 678.
- [38]GAGNON V, CHAZARENCO F, COMEAU Y, *et al.* Influence of macrophyte species on microbial density and activity in constructed wetlands[J]. Water science and technology, 2007, **56**(3): 249-254.
- [39]MEI X Q, YANG Y, TAM N F, *et al.* Roles of root porosity, radial oxygen loss, Fe plaque formation on nutrient removal and tolerance of wetland plants to domestic wastewater[J]. Water research, 2014, **50**(3): 147-159.
- [40]冯岚, 严岩, 韩建刚. 根表铁膜对凤眼莲吸收环丙沙星的影响[J]. 生态毒理学报, 2021, **16**(5): 326-333.
- [41]EMERSON D, WEISS J V, MEGONIGAL J P. Iron-oxidizing bacteria are associated with ferric hydroxide precipitates (Fe-Plaque) on the roots of wetland plants[J]. Applied and environmental microbiology, 1999, **65**(6): 2758-2761.
- [42]张秀, 郭再华, 杜爽爽, 等. 砷胁迫下水磷耦合对不同磷效率水稻根表铁膜及其各部位砷含量的影响[J]. 生态毒理学报, 2013, **8**(2): 172-177.
- [43]WAN X, LI Y, LI C, *et al.* Effect of iron plaque on the root surface of hydrophyte on nitrogen and phosphorus transformation[J]. Bioresource technology reports, 2020, **12**: 100566.
- [44]LIPHADZI M S, KIRKHAM M B, MUSIL C F. Phytoremediation of soil contaminated with heavy metals: A technology for rehabilitation of the environment[J]. South African journal of botany, 2005, **71**(1): 24-37.
- [45]江绪文, 李贺勤, 王建华. 盐胁迫下黄芩种子萌发及幼苗对外源抗坏血酸的生理响应[J]. 植物生理学报, 2015, **51**(2): 166-170.
- [46]BATTKE F, ERNST D, HALBACH S. Ascorbate promotes emission of mercury vapour from plants[J]. Plant, cell and environment, 2005, **28**: 1487-1495.
- [47]TAMAOKI M, MUKAI F, ASAI N, *et al.* Light-controlled expression of a gene encoding L-galactono- γ -lactone dehydrogenase which affects ascorbate pool size in *Arabidopsis thaliana*[J]. Plant science, 2003, **164**(6): 1111-1117.
- [48]张国伟, 张永波, 吴艾静, 等. 湿地植物对煤矿老窑水污染土壤中重金属的富集能力研究[J]. 环境污染与防治, 2021, **43**(10): 1244-1248.
- [49]ZHENG Y, WANG X C, GE Y, *et al.* Effects of annual harvesting on plants growth and nutrients removal in surface-flow constructed wetlands in northwestern China[J]. Ecological engineering, 2015, **83**: 268-275.
- [50]廖德润, 林国徐, 王振, 等. 植物收割频率对水生植物滤床深度处理养猪废水的影响[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(12): 4793-4798.
- [51]郭长城, 胡洪营, 李锋民, 等. 湿地植物香蒲体内氮、磷含量的季节变化及适宜收割期[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(3): 1020-1025.
- [52]MAURIZIO B, MICHELA S. Effects of five macrophytes in nitrogen remediation and mass balance in wetland mesocosms[J]. Ecological engineering, 2012, **46**: 34-42.
- [53]李冰, 舒艳, 李科林, 等. 人工湿地宽叶香蒲对重金属的累积与机理[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(4): 2099-2108.
- [54]王华, 唐树梅, 廖香俊, 等. 锰超积累植物——水蓼[J]. 生态环境, 2007, **3**: 830-834.
- [55]LEWANDOWSKI Z, STOODLEY P, ALTOBELLI S A. Experimental and conceptual studies on mass transport in biofilms[J]. Water science and technology, 1995, **31**(1): 153-162.
- [56]SINGH R, PAUL D, JAIN R K. Biofilms: Implications in bioremediation[J]. Trends in microbiology, 2006, **14**(9): 389-397.
- [57]WANG J W, LONG Y N, YU G L, *et al.* A Review on microorganisms in constructed wetlands for typical pollutant removal: Species, function, and diversity[J]. Frontiers in microbiology, 2022, **13**: 845725.
- [58]王志刚, 韩雪, 刘运平, 等. 狐尾藻和菖蒲对养猪场废水的净化效果及其根系形态[J]. 湿地科学, 2022, **20**(6): 768-774.
- [59]阙振业, 李馨, 王静瑶. 湿地芦苇茎上微生物群落分析[J]. 环境生态, 2022, **4**(10): 78-84.
- [60]WANG Y A, ZHANG R Y, DUAN J Z, *et al.* Extracellular polymeric substances and biocorrosion/biofouling: Recent advances and future perspectives[J]. International journal of molecular sciences, 2022, **23**(10): 5566.
- [61]LIU J, WANG F, WU W, *et al.* Biosorption of high-concentration Cu (II) by periphytic biofilms and the development of a fiber periphyton bioreactor (FPBR)[J]. Bioresource technology, 2018, **248**(B): 127-134.
- [62]LI D X, XI H L. Layered extraction and adsorption performance of extracellular polymeric substances from activated sludge in the enhanced biological phosphorus removal process[J]. Molecules, 2019, **24**(18): 3358.
- [63]陈满军, 方燕, 戢茜, 等. 再力花强化人工湿地除汞效能的试验研究[J]. 环境生态学, 2021, **3**(8): 59-65.
- [64]RANI A, SOUCHE Y S, GOEL R. Comparative assessment of in situ bioremediation potential of cadmium resistant acidophilic *Pseudomonas putida* 62BN and alkalophilic *Pseudomonas monteilii* 97AN strains on soybean[J]. International biodeterioration

- and biodegradation, 2009, **63**(1): 62-66.
- [65]ZHANG L, KANG- YUN C S, LU X, *et al.* Adsorption and intracellular uptake of mercuric mercury and methylmercury by methanotrophs and methylating bacteria[J]. *Environmental pollution*, 2023, **331**(1): 121790.
- [66]张丽丽, 赵九洲, 赵婷婷, 等. 重金属铅和镉对溪荪生理特性的影响[J]. *湿地科学*, 2011, **9**(2): 198-202.
- [67]廖明晶, 范敬龙, 匡代洪, 等. 种植多枝怪柳的模拟人工湿地对模拟污水中氮、磷、铅和镉的去除率研究[J]. *湿地科学*, 2021, **19**(6): 715-725.
- [68]郑萌盟, 谭艾娟, 吕世明, 等. 耐镉浮萍筛选、鉴定及其对镉的富集效果[J]. *环境工程学报*, 2022, **16**(2): 471-480.
- [69]LI J T, BAKER A J, YE Z H, *et al.* Phytoextraction of Cd-contaminated soils: Current status and future challenges[J]. *Critical reviews in environmental science and technology*, 2012, **42**(20): 2113-2152.
- [70]劳昌玲, 罗立强, 沈亚婷, 等. 微生物与重金属相互作用过程与机制研究进展[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(8): 1929-1937.

Research Progress on Pollutant Removal Mechanism of Plants in Constructed Wetland

GONG Shen¹, CHAO Chuanxin², ZOU Dongsheng¹, XIE Yonghong²

(1. *College of Environment and ecologic, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, P.R.China;*

2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, Hunan, P.R China)

Abstract: Constructed wetland system has the advantages of good treatment effect and low cost, and is widely used in sewage treatment, in which aquatic plants play an irreplaceable important role in the treatment process. In this paper, the types of aquatic plants, the general mechanism of pollutant removal and the removal mechanism of typical pollutants and heavy metals in constructed wetlands were reviewed. The applicable conditions and removal effects of plant transformation mechanism, root exudates and environmental response mechanism, leaf volatilization mechanism, pollutant storage mechanism and biofilm filtration mechanism were analyzed. Finally, the problems existing in the process of using wetland plants to remove water pollutants were discussed, in order to provide reference for the development and application of ecological restoration technology of constructed wetland plants.

Keywords: removal mechanism; wetland plants; contaminants; constructed wetland