

人工湿地水质净化机理与生态工程研究进展

蒋廷杰^{1a}, 齐增湘^{1b}, 罗军², 甘德欣^{1b*}

(1.湖南农业大学 a.科学技术处; b.园艺园林学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南省森林植物园, 湖南 长沙 410116)

摘要: 在阐述人工湿地净化污水机理的基础上, 综述近年来国内外出现的各种新型污水生态处理技术: 构建复合人工湿地系统、蚯蚓生态滤池、生物栅与生物浮岛、生态砾石床技术和人工水草生态净化技术。

关键词: 人工湿地; 污水净化; 机理; 生态工程

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2010)03-0356-07

Mechanism of sewage purification and study progress of ecological engineering in constructed wetland

JIANG Ting-jie^{1a}, QI Zeng-xiang^{1b}, LUO Jun², GAN De-xin^{1b*}

(1.a.Department of Science and Technology; b.College of Horticulture and Landscape, HNAU, Changsha 410128, China;
2.Hunan Forestry Botanical Garden, Changsha 410116, China)

Abstract: Based on the sewage purification mechanism of constructed wetland, the new sewage purification methods using ecological engineering technology which appeared recently at home and abroad were summarized as follows: It is essential to establish compound constructed wetland systems, earthworm ecology filter ponds, bio-railings and biological floating island with eco-gravel-bed technology and artificial plants purification technology as well.

Key words: constructed wetland; sewage purification; mechanism; ecological engineering

国际湿地公约(Ramsar公约)将湿地定义为: “湿地是指不问其为天然或人工、长久或暂时性的沼泽地、泥炭地、水域地带, 静止或流动的淡水、半咸水、咸水, 包括低潮时水深不超过6m的海水水域”^[1]。湿地是一类既不同于水体, 又不同于陆地的特殊过渡类型生态系统, 是水生、陆生生态系统界面相互延伸扩展的重叠空间区域。该系统与周围相邻的系统有密切关系, 与它们发生物质和能量交换^[2]。湿地具有重要的生态服务功能: 涵养水源、孕育生境、调节气候、湿润空气、净化环境、维持生物多样性, 以及提供教育、科研、旅游及文化服务场所等。另外还有在城市水循环中的排毒功能(滞

留与降解污染物、吸纳多余的营养物)和洪水调蓄功能, 被誉为“地球之肾”^[3]。

人工湿地(constructed wetland)是人们仿照自然湿地设计、建造, 且可控制和工程化的水生生态系统^[4], 一般由人工基质(如土壤、碎石、卵石等)、特定的水生植物(如芦苇、菖蒲、水葱等)、特定的水生动物(如鱼、蛙、水生软体动物等)等组成, 是一种独特的“土壤—植物—动物—微生物—水体”生态系统^[5], 具备水质净化与环境美化双重功能。研究表明, 人工湿地能够利用复合生态系统, 通过物理、化学和生物三重协调作用来实现对污水的高效净化。笔者综述了有关人工湿地土壤(基质)、湿地

收稿日期: 2009-11-24

基金项目: 湖南省科学技术厅项目(2008FJ3048); 湖南省自然科学基金项目(08JJ6021); 湖南农业大学青年科学基金项目(07QN41)

作者简介: 蒋廷杰(1973—), 男, 湖南道县人, 硕士, 高级农艺师, 从事园艺栽培、农业生态和科技管理工作, jtg8273@126.com;

* 通讯作者, dexingan@126.com

植物、微生物和水生动物对于污水净化的机理研究进展,对人工湿地生态工程技术的最新进展和应用进行了展望。

1 人工湿地水质净化机理

人工湿地对污水的作用机理十分复杂,一般认为,人工湿地生态系统是通过物理、化学及生物三重协同作用净化污水。物理作用主要是过滤、截留污水中的悬浮物,并沉积在基质中;化学反应包括化学沉淀、吸附、离子交换、拮抗和氧化还原反应等;生物作用则是指微生物和水生动物在好氧、兼氧及厌氧状态下,通过生物酶将复杂大分子分解成简单分子、小分子等,实现对污染物的降解和去除。

1.1 基质净化机理

人工湿地中的基质由土壤、细砂、粗砂、砾石、碎瓦片、粉煤灰、泥炭、页岩、铝矾土、膨润土、沸石等介质中的一种或几种所构成,是湿地植物的直接支撑者,为植物和微生物提供营养,具有巨大的比表面积,易形成生物膜,污水流经颗粒表面时,污染物通过沉淀、过滤、吸附作用被截留^[6],不同的基质有不同的处理能力^[7-8]。湿地基质的类型、结构和肥力状况直接决定湿地植物的类型、数量和质量,并通过食物链影响湿地动物的类群、生长和发育,最终影响湿地生态系统的物质生产。基质也是湿地微生物、水生动物的生活场所,在基质颗粒的周围形成生物膜,通过提供能源和适宜的厌氧条件加强氮的转化。研究表明,在不考虑植物因素条件下,经过湿地处理的模拟生活污水的COD、BOD₅、TSS、总氮、总磷等污染物浓度下降,水质得到改善^[9]。研究还表明,选择合适的人工湿地基质材料和厚度,对提高人工湿地净化能力至关重要^[9-11]。

1.2 植物净化机制

植物是湿地中最重要的去污成分之一,在人工湿地净化污水的过程中起着重要作用。根据植物对污水净化机理的差别,可分为直接净化作用和间接净化作用。直接净化作用是指植物通过吸收、吸附和富集等作用直接去除污水中污染物^[12]。间接净化作用是指植物根、茎输送氧气,增强和维持基质的水力传输,影响水力停留时间,通过根系巨大的表

面积创造利于各种微生物生长的微环境^[8,13-14]。

1.2.1 直接净化作用

植物在生长过程中能吸收污水中的无机氮、磷等,供其生长发育。湿地植物对氮的去除作用主要是:氨的挥发作用、NH₄⁺的阳离子交换作用、吸收、硝化和反硝化作用等。科学家研究认为,通过植物根部根毛周围充满氧气的液体薄膜中的好氧微生物的硝化作用,可将NH₄⁺转化成气体,释放到大气中。除此之外,植物本身也可以吸收一部分NH₄⁺,NH₄⁺进入植物后通过氨化反应将其去除,合成蛋白质、氨基酸、酶等有机氮,消除其对植物的毒害作用,然后通过收割植物去除。污水中无机磷在植物吸收及同化作用下可转化为植物的ATP、DNA等有机成分,通过植物的收割而从系统中去除^[15]。

有研究表明,香蒲每年每公顷可吸收2 630 kg氮、403 kg磷和4 570 kg钾^[16]。对不同水生植物如凤眼莲、香蒲和糜稷^[17]、香蒲、菖蒲^[18]、芦苇、水葱、香蒲、千屈菜^[19]、芦苇^[20]的研究表明,水生植物对硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐、铵等有很好的去除效果。除营养元素外,大型水生植物还可吸收铅、镉、砷、汞和铬等重金属,以金属螯合物的形式蓄积于植物体内的某些部位,通过植物的产氧作用使根区含氧量增加,促进污水重金属的氧化和沉降,还可通过植物挥发、甲基化等作用达到对污水和受污染土壤的生物修复。重金属在一般植物中的积累量为0.1~100 μg/g^[21],研究发现,凤眼莲可以富集铜、铅、镉、铬、汞、锌和银^[17, 22]。香蒲对铅、锌、铜、镉吸收的绝对量分别为128、1 375、28、120 mg/kg^[23]。风车草能吸收富集水体中30%的铜和锰,对锌、镉、铅的富集也在5%~15%^[24]。芦苇净化Pb、Mn、Cr的能力分别是80.18%、94.54%和100%,槐叶、细绿萍、泽泻、狭叶慈菇、苕菜、美人蕉、红蛋等对Cd、As、Hg、Zn等重金属均有一定的吸收净化作用^[25-26]。有机污染物的去除是湿地植物通过吸收积累非毒性代谢物,强化根际的矿化作用,以及氧化-还原反应、水解反应来实现无毒^[27]和达到提高病原体去除率的效果^[28-29]。

1.2.2 间接净化作用

污染物中有机物和氮的降解需要微生物和氧的参与,生长在湿地中的挺水植物进行光合作用产

生的氧向地下部运输,释放氧到根区,使水体中的溶解氧增加,在植物根区周围的微环境中依次形成好氧区、兼氧区和厌氧区,在缺氧的基质中创造氧化条件,能促进有机物的氧化分解和硝化细菌的生长,有利于硝化、反硝化反应和微生物对磷的过量积累作用,达到除氮、磷的效果;另一方面在厌氧条件下通过厌氧微生物对有机物的降解、或开环、或断键形成简单分子、小分子,提高对难降解有机物的去除效果^[8]。

人工湿地运行过程中,内部会出现堵塞的问题。在潜流型人工湿地中,基床中的水流一般是沿活的或死的根和根区形成的沟道及土壤的孔隙流通的。当根和根区生长时,它们干扰和疏松土壤,根和根区死亡腐烂后,留下一些管形的孔或沟(大孔),由于植物的根和根系对基质的穿透作用,减小了基质的封闭性,增强了基质的疏松度,能非常有效地使水通过基质,使基质的水力传输得到加强和维持,提高基质的渗透率。湿地植物根孔具有土壤大孔隙的一般功能,如产生优先水流,从而提高土壤的渗透性;为氧气输入和甲烷排放提供优先路径等^[30-31]。即使较板结的土壤,在2~5年内,经过植物根系的穿透作用,其水力传输能力可与砾石、碎石相当^[32]。湿地的植被降低了水流速度,延长了污水在湿地内部的停留时间,为悬浮物的沉淀创造了良好的条件,同时,在大气和湿地基质或水表面之间起到生物膜的作用,使风速在近基质或水表面降低,减少了沉淀物的再次悬浮,提高了去除污染物的能力^[9]。

人工湿地中的水生植物除自身具有较强的对营养物质吸附、富集功能外,还与其周围环境的原生动物、微生物形成各种小环境。淹没在水中的植物的茎和叶提供了一个巨大面积的生物膜,大量光合藻类以及细菌和原生动物都集聚在植物组织上。同样,根和根区埋在湿地土壤中,根系及其根际分泌物,能为微生物的生长提供营养及场所。因此,植物的地上和地下部组织都可以形成生物膜,具有典型的活性生物膜功能,为微生物的吸附和代谢提供了良好的生化环境。特殊的根际微生态环境,提高了多种污染物富集和吸收分解的能力^[33]。这些生物膜以及湿地中所有其他固体表面的生物膜,

包括死的植物组织,对于湿地中发生的所有微生物进程都具有重要作用^[34]。湿地植物还具有过滤和抑藻等效应^[35]。

1.3 微生物净化机制

湿地微生物主要有菌类、藻类、原生动物和病毒。微生物在湿地养分的生物地球化学循环过程中往往起核心作用,湿地中的微生物是其生态系统中的重要组成部分,在净化污染物方面发挥着重要的作用。污水中有机物的降解和转化主要是由湿地微生物活动来完成的。湿地微生物还具有吸附作用,在微生物生长过程中,需要吸收一些营养元素和重金属元素以保证生长和代谢,它们分泌的高分子聚合物,对重金属有较强的络合力。硫酸还原菌还原污水中的硫酸根产生的硫化氢与废水中的重金属反应生成金属硫化物沉淀,使废水中金属离子得到有效净化^[25]。相关研究发现,湿地植物根区的细菌总数与 BOD_5 去除率之间存在显著相关性;氨氮的去除率与根际硝化细菌和反硝化细菌数量的相关性极显著^[9]。曲霉属生物体可有效地吸附Au,枯草杆菌可有效地吸附Au、Ag和Se等^[25]。

1.4 水生动物净化机制

人工湿地中的水生动物有提高土壤通气透水性能和促进有机物的分解转化的生态功能。底栖动物螺蛳、螃蟹、小型软体动物、摇蚊幼虫、水蚯蚓、贝壳等和淡水鱼虾形成湿地生态系统食物链的消费者。水中的浮游生物是鱼类的饵料,通过改变鱼类的数量结构来操纵植食性浮游动物的群落结构,促进滤食效率高的植食性浮游动物生长,进而降低藻类生物量,改善水质。蚌类的增多可使水质变清,从而为轮藻类植物的大量生长提供有利条件,为草食性水禽提供食物,扩大水禽的数量及停留时间^[36]。

2 人工湿地生态工程研究进展

水污染实质上是污水中的各种对环境有害的有机污染物和植物营养元素超过水体生态系统的自净能力,导致生态系统的退化。人工湿地生态工程技术可有效改善和恢复水域生态环境,并具有投

资、维护和运行费用低廉,管理简便,处理效果好,回收资源和能源以及收获经济植物等优点,是一种有效的污水处理新途径。目前研究和应用的湿地生态工程主要包括人工湿地、蚯蚓生态滤池、生物栅与生物浮岛技术、生态砾石床和人工水草净化技术等生态工程污水处理技术,并取得了显著成效。

2.1 构建复合人工湿地系统

人工湿地净化污水是基质、植物、微生物共同作用的结果^[14-26]。目前,人工湿地污水处理生态工程技术,按水流形式可分为表面流和潜流人工湿地,其中在潜流基础上又改造成了垂直流、波形潜流人工湿地系统等^[37]。表面流人工湿地,依靠植物根茎的拦截作用以及根茎上形成的生物膜的降解作用去除污染物,去除 BOD_5 , COD 效果较好^[38],但不能充分利用基质及植物根系作用,容易产生异味、孳生蚊蝇等不良效果^[39]。潜流人工湿地系统,可以充分利用湿地中基质,相对表面流人工湿地卫生条件及保温效果好,受气候影响小,被欧洲、澳大利亚和南非等国广泛接受^[40],并应用于许多工程。垂直流人工湿地是结合表面流与潜流人工湿地的特点而成^[41],但易孳生蚊蝇,操作、管理不便。波形流人工湿地增加水流的曲折性,使污水以波形的流态多次经过湿地内部基质,在传统潜流湿地内部增设导流板,将布水方式设计成波形流动^[42]。相对于传统湿地,波形流湿地在垂直方向上的处理更加优越^[37]。有研究指出,复合人工湿地能取得较好的处理效果^[43]。

2.2 蚯蚓生态滤池

在土壤中引入一定量的适合的蚯蚓种类而形成“蚯蚓床”,再引入污水进行处理,由于蚯蚓具有增加过滤层通透性和清除未完全分解堵塞的有机物沉淀功能^[44],使得污水的物理性过滤处理过程和有机物的分解处理过程得以分开进行,大大降低了蚯蚓生态滤池所需要的体积和处理的时间,极大地提高了滤池的处理效率,降低了成本。在处理过程中,污水养殖了蚯蚓,蚯蚓改良了土壤,通过蚯蚓的生命活动,把原本对环境有害的有机污染物和植物营养元素重新转化为土壤中的肥力和蚯蚓机体的组

成部分,既处理了污水,又改良了土壤,而蚯蚓本身则可成为一种高蛋白饲料的来源,实现了资源的良性循环和再生^[45]。上海的中试结果^[46-47]表明,蚯蚓生态滤池 COD 去除率达83%~88%, BOD_5 去除率达91%~96%, SS 去除率达85%~92%,氨氮去除率达55%~65%,总磷去除率35%~65%,污泥总产率为0~2 mg/L。

2.3 生物栅与生物浮岛

生物栅、生物浮岛均是在水中为参与水体污染物净化的微生物、原生动物、小型浮游动物等提供附着生长条件的设施。生物栅是在固定支架上设置绳状生物接触材料,使大量参与污染物净化的生物附着生长,由于其固着生长,不易被大型水生动物和鱼类吞食,使单位体积的水体中生物数量呈几何级数增加,净化能力得以强化。生物浮岛技术是将高等水生植物或改良的陆生植物种植到富营养化水域水面上,通过植物根部的吸收、吸附作用和物种竞争相克机理,消除富集在水体中的氮、磷及有害物质,从而达到净化水质的效果^[48]。在选用有一定经济价值的浮床植物作为植物材料,能在净化水质的同时收获农产品,使原来有害于水体的营养物质N、P元素变为具有实用价值的经济作物的养分来源,还能在一定程度上重建并恢复水生生态系统,创造生物(鸟类、鱼类)的生息空间,改善景观,并且具有一定的消波效果,可对驳岸进行保护^[48-49]。1979年德国建造了最早的用于水处理的生物浮岛。20世纪90年代中期,日本创造多样性生态系统的人工浮岛技术用于湖泊治理^[49]。20世纪80年代以来,国内利用不同材料作为人工浮岛载体,种植各种植物,进行富营养化水体的净化研究^[50-52]。

2.4 生态砾石床技术

生态砾石床处理技术是将污染水体导入由砾石材料制成的生态滤床进行处理的方法。污水中的磷和悬浮性污染物由土壤及砾石的吸附作用去除,微生物在砾石表面形成的生物膜进行硝化反硝化作用对氮进行去除。该技术具有造价和运行费用低、水力负荷高的特点,是治理低污染环境水体的重要方法,在日本的河湖治理中已经得到了广泛应

用,净化效果好, BOD_5 、氨氮及总磷除去率为50%~60%,悬浮物去除率为75%~85%,实现了微污染水体(水体深度)净化的目的^[53]。

2.5 人工水草生态净化技术

人工水草是美国研制成功的一种有着水草形状的人造聚合物,具有巨大的生物附着表面积,其上能吸附大量微生物、原生动物、后生动物,成为鱼、虾良好的栖息地,营造出适宜各种生物的生态微环境,将水中无机和有机污染物进行高效降解和净化。据报道,中国广州、中山等城市利用这种人工水草治理景观水体,使水体的生态系统功能很快得以恢复,浮游藻类消失,水体腥臭味也得到消除,水体变得清澈透明,水中鱼类健康生长^[54]。

3 展 望

综上所述,人工湿地净化污水主要依赖湿地土壤(基质)、湿地植物、微生物和水生动物以及它们之间的相互作用,通过一系列复杂的物理、化学以及生物途径实现的。人工湿地具有能耗、费用低,技术要求和管理简单的特点^[55],在发展中国家具有很好的应用潜力^[56]。国内外对运用各种生态工程技术治理污染水体的研究较多,并且取得了较好的效果。但在实际的污水治理工作中采用的生态工程技术手段比较单一,因此,利用生态系统中物种共生、物质循环再生原理,应用各种技术开发多维的生态工程技术,积极导入并构筑合理的生态系统,克服各种单项技术的弊端,充分体现多种生态工程技术结合所带来的强大生态功能,获得污水处理与资源化的最佳效益。湿地生态工程技术在以下方面有待于进一步开展工作。

(1) 研究以湿地污水处理工程建设与管理技术相结合的环境治理生态工程与技术,开发人工湿地污水处理新技术与新方法,并在生产实践上获得效益。结合不同地区不同污水的特性,筛选出能具有经济价值的超积累植物,不仅能把吸收的污染物(特别是重金属)转移、贮存到茎叶,而且能回收有价值的成分,起到“植物采矿作用”,选择合理的植物配置形式有助于提高污染物的处理效率^[57]。对水生动物参与污染物净化方面的作用过程进行研究。营建生

化一体化水生动植物复合生态体系,构建一个完整的、良性循环的生态系统^[58]。

(2) 运用景观生态学、农业生态学的理论与方法,加强人工湿地生态工程模式与配套管理技术研究,如云南洱海流域的“塘-人工湿地-草滤带”复合处理系统^[59],中国三江平原湿地首创的“稻-苇-鱼”、在珠江三角洲建设的“桑基鱼塘”等湿地农业生态工程,取得显著的社会、经济和生态效益^[2]。

引入活性污泥数学模型,并根据水质和负荷进行人工湿地生态工程的设计^[60],同时,生态工程的发展要体现“人居-产业-景观”的融合。人工湿地生态工程应融入园林设计和园林工程技术,不仅要在净化污水上发挥重大作用,而且要为居民提供可观、可赏、可憩的自然生态景观场所,让人们感受到大自然的和谐与野趣,获取最大的生态效益和社会经济效益。

参考文献:

- [1] 李博. 生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 280.
- [2] 杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2): 111-120.
- [3] 王如松. 圆明园塑膜防渗风波的生态学思考[J]. 科技导报, 2005, 23(6): 4-6.
- [4] Bachand P A M. Denitrification in constructed free-water surface wetlands[J]. Ecological Engineering, 2000, 16(1): 17-32.
- [5] Dunne E J, Culleton N O, Donovan G, et al. An integrated constructed wetland to treat contaminants and nutrients from dairy farmyard dirty water[J]. Ecological Engineering, 2005, 21(3): 221-234.
- [6] 郑洁敏, 牛天新, 宋亮. 污水生态处理技术概述[J]. 杭州农业科技, 2008(2): 26-28.
- [7] 廖婧琳, 苏跃, 徐德福, 等. 人工湿地生态工程中基质的筛选及应用研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(8): 125-128.
- [8] Kaoru Abe, Yasuo Ozaki. Wastewater treatment by using kenaf in paddy soil and effect of dissolved oxygen concentration on efficiency[J]. Ecological Engineering, 2007, 23(9): 125-132.
- [9] 周红菊, 尚忠林, 王学东, 等. 湿地净化污水作用及其机理研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(4): 64-66.
- [10] Yasar Avsara, Hussein Tarabeah, Shlomo Kimchie, et al. Rehabilitation by constructed wetlands of available

- wastewater treatment plant in Sakhnin[J]. Ecological Engineering , 2007 , 23(6) : 27-32 .
- [11] Headley T R , Herity E , Davison L. Treatment at different depths and vertical mixing within a one-metre deep horizontal subsurface-flow wetland[J] . Ecological Engineering , 2005 , 21(5) : 567-582.
- [12] Cheng S P , Wu Z B , Kuang Q J. Macrophytes in artificial wetland[J]. Journal of Lake Sciences , 2002 , 14(2) : 179-184.
- [13] Vymazal J. The use of subsurface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience[J]. Ecological Engineering , 2002 , 18(5) : 633-646.
- [14] Wood A. Constructed wetlands in water pollution control fundamentals to their understanding[EB/OL] . <http://www.cnpc.com.cn/CNPC/hjysh/syzs/lsht/2008-02-18>.
- [15] 张京梅 . 污水湿地处理中植物的净化作用[EB/OL]. <http://www.cnpc.com.cn/CNPC/hjysh/syzs/lsht/2008-02-18> .
- [16] Brix H. Functions of macrophytes in constructed wetland[J]. Water Science and Technology , 1994 , 29(4) : 71-78.
- [17] Maine M A , Suñe N , Hadad H , et al. Nutrient and metal removal in a constructed wetland for wastewater treatment from a metallurgic industry[J]. Ecological Engineering , 2006 , 22(6) : 341-347.
- [18] Noeon Park , Joon Ha Kim , Jaeweon Cho. Organic matter , anion , and metal wastewater treatment in Damyang surface-flow constructed wetlands in Korea[J]. Ecological Engineering , 2008 , 24(2) : 68-71.
- [19] 翟旭 , 吴树彪 , 侯保朝 , 等. 人工湿地植物净化效果研究[J]. 安徽农业科学 , 2009 , 37(31) : 15368-15370.
- [20] 马永胜 , 赵冉 , 孙光 , 等. 人工湿地对稻田排水净化效果的研究[J]. 东北农业大学学报 , 2009 , 40(7) : 45-48.
- [21] 尹士君 , 汤金如. 人工湿地中植物净化作用及其影响因素[J]. 煤炭技术 , 2006 , 25(12) : 115-118.
- [22] 马安娜 , 张洪刚 , 洪剑明. 湿地植物在污水处理中的作用及机理[J]. 首都师范大学学报 , 2006 , 27(6) : 57-63.
- [23] 李柳川 , 陈桂珠. 人工实验田中的香蒲对重金属的吸收效应研究[J]. 有色金属环保 , 1991(2) : 43-46.
- [24] Cheng S , Grosse W , Karrenbrock F , et al. Efficiency of constructed wetlands in decanted monition of water polluted by heavy metals[J]. Ecological Engineering , 2001 , 17(3) : 317-325.
- [25] 张宗元 , 赵志怀 , 陈宇松. 人工湿地处理酸性煤矿废水的机理研究及展望[J]. 科技情报开发与经济 , 2007 , 17(5) : 158-161.
- [26] 张超兰 , 陈文慧 , 韦必帽 , 等. 几种湿地植物对重金属胁迫的生理生化响应[J]. 生态环境 , 2008 , 17(4) : 1458-1461.
- [27] Davies L C , Cabrita G , Carias C C , et al. *Phragmites* spp. enzymatic role in constructed wetlands towards azo-dye mitigation[J]. Ecological Engineering , 2005 , 21(5) : 594-605.
- [28] Soto F , Garcý M , de Luýs E , et al. Role of *scirpus lactustris* in bacterial and nutrient removal from wastewater[J]. Wat Sci Tech , 1999 , 40(3) : 241-247.
- [29] Decamp O , Warren A. Investigation of ecological removal in various designs of subsurface flow wetlands used for wastewater treatment[J]. Ecological Engineering , 2000 , 16(4) : 293-299.
- [30] 李贵宝 , 周怀东 , 尹澄清. 湿地植物及其根孔在非点源污染治理中的展望[J]. 中国水利 , 2003(4) : 51-52.
- [31] 王学东 , 李贵宝 , 王殿武 , 等. 植物根孔的特性及其生态功能研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报 , 2005 , 3(11) : 74-78.
- [32] 李林锋 , 年跃刚 , 蒋高明. 人工湿地植物研究进展[J]. 环境污染与防治 , 2006 , 28(8) : 616-619.
- [33] 安树青 . 湿地生态工程-湿地资源利用与保护的优化模式[M]. 北京 : 化学工业出版社 , 2002 : 328-383.
- [34] 李晓东 , 孙铁珩 , 李海波 , 等. 人工湿地除磷研究进展[J]. 生态学报 , 2007 , 27(3) : 1226-1232.
- [35] 吴建强 , 阮晓红 , 王雪. 人工湿地中水生植物的作用和选择[J]. 水资源保护 , 2005 , 21(1) : 1-6.
- [36] 陈甜甜 , 夏宜平. 富营养化浅水湖泊的生态修复[J]. 园林工程 , 2006(3) : 32-35.
- [37] 李丽 , 王全金. 人工湿地在污水处理中的研究进展[J]. 华东交通大学学报 , 2007 , 24(1) : 57-60.
- [38] Greenway M. The role of constructed wetlands in effluent treatment and water reuse in subtropical and arid Australia[J]. Ecological Engineering , 2005 , 21(5) : 501-509.
- [39] Ives Magloire Kengne , Francois Brissaud , Amougou Akoa , et al. Mosquito development in a macrophyte-based wastewater treatment plant in Cameroon (Central Africa)[J]. Ecological Engineering , 2003 , 19(1) : 53-56.
- [40] 葛丽英 , 谈玲 , 何成达 , 等. 波形潜流人工湿地污水处理技术研究[J]. 扬州大学学报:自然科学版 , 2004 , 7(4) : 75-78.
- [41] 吴建强 , 姚建杰 , 王敏. 2 种人工湿地污水净化效果及其耐污染负荷冲击能力研究[J]. 上海环境科学 , 2009 , 28(4) : 157-161.
- [42] Gersberg R M. Nitrogen removal in artificial wetlands[J]. Water Research , 1983 , 17(9) : 1009-1014.

- [43] Vymazal J. Constructed wetlands with horizontal sub-surface flow and hybrid systems[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 21(5): 478-481.
- [44] 朱继红, 宋碧玉, 王启中, 等. 新型污水生态工程处理技术[J]. *污染防治技术*, 2003, 16(4): 107-110.
- [45] 杨键, 杨健, 娄山杰. 一种新型环境友好污水处理工艺——蚯蚓生态滤池[J]. *国土资源综合利用*, 2008, 26(1): 16-19.
- [46] 王树乾. 蚯蚓微生物生态滤池处理城镇污水的研究[D]. 上海: 同济大学环境科学与工程学院, 2003: 98-100.
- [47] 杨健, 陆雍森, 王树乾. 绿色生态滤池处理城镇污水的中试研究[J]. *江苏环境科技*, 2000, 13(4): 1-3.
- [48] 井艳文, 胡秀琳, 许志兰, 等. 利用生物浮岛技术进行水体修复研究与示范[J]. *北京水利*, 2003(6): 20-22.
- [49] 丁则平. 日本湿地净化技术人工浮岛介绍[M]. *海河水利*, 2007(2): 63-65.
- [50] 吴伟明, 宋祥甫, 邹国燕. 自然水域浮岛无土栽培[J]. *植物杂志*, 1997(2): 22-24.
- [51] 刘淑媛, 任久长, 由文辉. 利用人工基质无土栽培经济植物净化富营养化水体的研究[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 1999, 35(4): 518-522.
- [52] 由文辉, 刘淑媛, 钱晓燕. 水生经济植物净化受污染水体研究[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2000, 23(1): 99-102.
- [53] 林武, 陈敏, 罗建中, 等. 生态工程技术治理污染水体的研究进展[J]. *广东化工*, 2008, 35(4): 42-46.
- [54] 程伟, 程丹, 李强. 水生植物在水污染治理中的净化机理及其应用[J]. *工业安全与环保*, 2005, 31(1): 6-9.
- [55] Mauricio E Arias, Mark T Brown. Feasibility of using constructed treatment wetlands for municipal wastewater treatment in the Bogotá Savannah, Colombia[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 25(5): 1070-1078.
- [56] Amelia K Kivaisi. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: A review[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 17(6): 545-560.
- [57] Thullen J, Sartoris J, Nelson S M. Managing vegetation in surface-flow wastewater-treatment wetlands for optimal treatment performance[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 21(5): 583-593.
- [58] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003(4): 36-40.
- [59] 金丹越, 卢少勇, 金相灿, 等. 洱海流域村落污水塘-人工湿地-草滤带复合工艺设计[J]. *给水排水*, 2008(34): 35-38.
- [60] 周琪. 人工湿地技术在污水处理与水环境保护中的应用[J]. *给水排水动态*, 2009(10): 17-18.

责任编辑: 罗慧敏
英文编辑: 胡东平