

人工湿地植物研究进展*

李林锋^{1,2} 年跃刚³ 蒋高明²

(1. 湛江海洋大学农学院, 广东 湛江 524088; 2. 中国科学院北京植物研究所, 北京 100093;

3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要 人工湿地具有去除污染效果好、运行费用低和易维护等特点, 已被广泛用于污水处理中。湿地植物在其中起着重要作用, 主要包括直接吸收氮、磷等污染物, 通过根系输氧促进根区的氧化还原反应与好氧微生物活动及增强和维持介质的水力传输等。综述了人工湿地植物的去污机理, 阐述了湿地植物对生物可降解的有机物、营养性污染物和有毒有害物质净化的研究成果与应用, 并展望今后进一步研究的重点。

关键词 人工湿地 植物 污水处理

Macrophytes in constructed wetland for wastewater treatment Li Linfeng^{1,2}, Nian Yuegang³, Jiang Gaoming². (1. College of Agricultural, Zhanjiang Ocean University, Zhanjiang Guangdong 524088; 2. Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093; 3. Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012)

Abstract: Constructed wetland is often employed for treating various wastewaters because of its many advantages: low overall cost, high efficiencies for pollutant removal, simple operation and stable performance. Macrophytes in such constructed wetlands perform many ecological functions, including assimilating and storing nutrient elements such as nitrogen and phosphorus, transporting O₂ to the root zone, providing substrates for microbes, enhancing and maintaining hydraulic conductivity. These functions are responsible for the enhanced removal of organic matter, nutrient and toxic substance in the wetland populated with desirable macrophytes. Establishing the most effective plant community, physiology of macrophytes, effects of macrophytes on oxygen production and transport, and interactions between the plants and microorganisms in the wetland were identified as the areas that need additional research.

Keywords: Constructed wetland Macrophytes Wastewater treatment

人工湿地是 20 世纪 70 年代蓬勃兴起的处理污水的方式, 它的原理主要是利用湿地中基质、湿地植物和微生物之间的相互作用, 通过一系列物理的、化学的以及生物的途径来净化污水^[1]。1953 年, 德国 Max Planck 研究所 Seidel 博士在研究中发现芦苇 (*Phragmites australis*) 能去除污水中大量有机物和无机物^[2], 随后开发出 Max-planck Institute Process 系统, 这可能是世界上最早的人工湿地处理污水的雏形系统。而后 Seidel 与 Kickuth 合作并由 Kickuth 于 1972 年提出了“根区理论”^[3], 该理论的提出掀起了人工湿地研究与应用的热潮, 标志着人工湿地作为独具特色的新型污水处理技术正式进入水污染控制领域。植物是人工湿地的核心, 通过植物不但可以去除污染物, 还可以促进污水中营养物质的循环和再利用, 同时还能绿化土地, 改善区域气候, 促进生态环境的良性循环^[4-6]。本文重点阐述人工湿地植物研究和应用的状况, 并展望了今后进一步研究的重点。

1 人工湿地植物

水生维管束植物有 33 科、124 属、1 000 余种。按生态类型, 可分为湿生植物、挺水植物、浮叶植物、漂浮植物和沉水植物。已经发现其中有很多种类对有机污染和重金属污染具有很强的净化能力^[7]⁶⁴¹⁻⁶⁴³。朱斌等^[8]通过对近 10 年有关水生植物在净化水质方面的部分国内外期刊文献(共 95 篇)的统计后仅列出了研究频度排在前 12 位的 45 种植物(包括陆生植物美人蕉), 就涉及 30 科、44 属, 不仅涵盖上述所有的植物生态类型, 而且几乎所有的植物都曾作为人工湿地植物加以利用。按生活类型, 湿地植物可分为乔木、灌木和草本(多年生或 1 年生)。人工湿地大多利用草本植物(尤其是挺水植物)来净化污水, 如被普遍采用的芦苇 (*Phragmites australis*)、宽叶香蒲 (*Typha latifolia*) 和灯心草 (*Juncus effusus*)^[9,10] 等。利用乔木、灌木作为人工湿地植物的报道很少, 这主要是适应湿地环境的乔木、灌木不多^[11]。但也有一些乔木树

第一作者: 李林锋, 男, 1972 年生, 博士研究生, 讲师, 研究方向为植物生理生态。

*国家“十五”重大科技专项资助项目 (No. 2002AA601013)。

种,如两栖榕 (*Amphibious banyan*)^[12]、白千层 (*Melaleuca quinquenervia*)和茶树精油 (*Melaleuca alternifolia*)^[13]、池杉 (*Taxodium ascendens*)^[14]、水翁 (*Cleistocalyx operculatus*)^[15]和红树林部分树种如秋茄 (*Kandelia candel*)、桐花树 (*Aegiceras corniculatum*)和白骨壤 (*Avicennia marina*)^[16]作为湿地树种,都表现出对污染物较好的净化效果。按功能类型,湿地植物又可分为 C3 植物和 C4 植物。绝大多数的人工湿地植物为 C3 植物,仅少数为 C4 植物,如香根草 (*Vetiveria zizanioides*)^[17]、纸莎草 (*Cyperus papyrus*)和宽叶多脉莎草 (*Cyperus latifolius*)^[18]。随着人工湿地污水处理方式的大力推广,相信会有越来越多的人工湿地植物被挖掘和利用。

2 人工湿地植物去污机理

作为人工湿地系统构成组分之一的湿地植物,其净化污水的机理在于 3 个重要作用:(1)直接吸收污水中可利用态的营养物质、重金属和一些有毒有害物质;(2)为根区好氧微生物输送氧气;(3)增强和维持介质的水力传输^[19]179-180。

2.1 直接吸收

用于污水处理的湿地植物通常都具有生长快、生物量大和吸收能力强的特点,它们在生长的过程中,需要吸收大量的氮、磷等营养元素。如香蒲每年每公顷可吸收 2 630 kg 氮、403 kg 磷和 4 570 kg 钾^[20]。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,达到对污水和受污染土壤的生物修复^[7]644。李柳川等^[21]研究发现,香蒲对铅、锌、铜、镉吸收的绝对量分别为 128、1 375、28、120 mg/kg。

2.2 根区放氧

植物释放氧到根区,通过改变根区的氧化还原电位影响基质中的生物地球化学循环^[22]。王宜明^[23]以芦苇为例,依人工湿地床体中基质距根系的远近,将其分为好氧、缺氧和厌氧区等根际微处理单元。营养盐通过在好氧区的硝化过程将污水中的氨氮氧化为硝酸氮,而在缺氧区将硝酸盐,通过反硝化菌的作用,还原为亚硝酸盐,最终还原为氮气除去;对磷的去除则在还原区以磷酸盐的形式释放到流动相中,而在好氧区除磷菌有过度吸收磷酸盐的能力,将磷吸收去除。有研究表明,宽叶香蒲 (*Typha latifolia*)根系释放氧气的速率为 0.12~0.20 mmol/(g·h)^[24]。

2.3 增强和维持介质的水力传输

人工湿地植物影响水的运动,植物密度会影响到

植物减缓水流的速度,带来悬浮颗粒吸附与沉降的差异^[25]。另外,植物还为微生物的活动提供巨大的物理表面,湿地植物庞大的根系能和填料表面一起形成特殊的生物膜结构,对污染物的过滤、吸附、吸收和转化等有相当重要的作用,且植物根系表面也是重金属相有机物沉积的场所^[26]。由于植物根系对介质的穿透作用,在介质中形成了许多微小的气室或间隙,减少了介质的封闭性,增强了介质的疏松度,加强和维持了介质的水力传输。据报道,即使较板结的土壤,在 2~5 年之内,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^[19]181-184。

3 人工湿地植物的研究和应用

根据所利用的植物生活类型不同,水生维管束植物在水处理中的应用有 3 种方式:即沉水植物净化系统、综合生物塘系统和湿地系统(常规天然湿地、特殊天然湿地——红树林和人工湿地系统)^[7]645。在这些系统中,植物的光合作用使系统可以直接利用太阳能;而植物生长带来的适宜的栖息环境,使多样化的生命形式在系统中的生存成为可能,并且正是植物和生物的联合作用使污染物得以降解^[27]。利用沉水植物净化系统和综合生物塘系统处理污水的应用研究已有不少报道^[28,29]。而利用湿地(尤其是人工湿地)系统来净化污水,目前已发展成为完备和独立的污水处理技术。通常将该污水处理系统称之为“根区法”,可见植物在该系统中的重要地位和作用。

自德国 1974 年首先建立人工湿地以来,该工艺相继在欧洲、美国和加拿大等国得到推广和应用。应用人工湿地处理污水,其投资和日常运行费用仅为常规二级污水处理厂的 1/10~1/2 和 1/5~1/3,但其出水水质可达到或超过二级污水处理水平,且适用范围广泛,除处理城镇生活污水^[30]外,也能广泛用于农业^[31]、畜牧业^[32]、水产^[33]、食品^[34]和矿山^[35]等工农业废水及垃圾渗滤液^[36]的处理。

按照系统工程设计和水体流态的差异,人工湿地可划分为表面流和潜流。其中,潜流又可细分为水平潜流和垂直潜流。各类型在去污效果、运行和控制等方面的诸多特征均存在一定的差异^[37]。

根据待处理污水的性质和处理的目的不同,所采用的人工湿地类型及湿地植物也不尽相同。归纳起来,有 3 种情况:(1)以去除营养性污染物为目的;(2)以去除有机物为目的;(3)以去除重金属及有毒有害物质为目的。但不管出于何种目的,湿地植物在其中有着不可忽视的直接或间接作用。

3.1 湿地植物对营养性污染物去除的研究

氮、磷作为植物所需的重要营养元素,通常以多种形态存在于污水中会引起水体的富营养化,以致于降低水体水质和影响水体功能,所以长期以来污水脱氮除磷一直是污水处理的重要任务。Cooper^[38]的研究发现,种植水烛(*Typha angustifolius*)和灯心草的人工湿地基质中氮、磷分别比无植物的对照基质中低 18%~28%和 20%~31%,可见水烛和灯心草吸收利用了污水中部分的氮和磷。在海涂,芦苇床湿地系统是削减进入海洋过量营养物质的强有力手段之一^[39]。袁东海等^[40]通过对照实验研究了潜流人工湿地系统对污水氮的净化效果,结果发现石菖蒲(*Acorus gramineus*)、灯心草和蝴蝶花(*Iris japonica*)3 个有植物系统的总氮平均去除率为 77.7%、71.2%和 66.4%,而无植物系统的去除率仅为 55.8%。吴振斌等^[41]采用复合垂直流人工湿地系统研究了对污水磷的净化效果,结果发现 3 个有植物系统的去除率分别为 61%、65%和 59%,而无植物系统的去除率仅为 28%。以上实验都反映出植物对人工湿地系统氮、磷去除具有很大的影响,有植物的系统比无植物的系统拥有较高的去除率,而且植物的生长状况也直接影响到系统的去除效果,植物的良好长势是对氮、磷去除的重要保证。

3.2 湿地植物对有机物去除的研究

湿地植物对有机污染的净化效果也很明显。茭白、慈姑对城市污水 BOD 的去除率可达 80%以上。水葱可使食品厂废水中 COD 降低 70%~80%,使 BOD 降低 60%~90%^{[7]645-647}。诸惠昌等^[42]采用种植已达 4 年之久的芦苇床对进水 COD 为 400~800 mg/L 的乳制品厂废水进行处理,COD 的去除率达 97%~98%,BOD 的去除率达 98%~99%。骆世明^[43]在用潜流人工湿地处理猪场废水的研究中发现,在夏季进水 COD 高达 1 000~1 400 mg/L 的情况下,风车草(*Cyperus alternifolius*)和香根草人工湿地对 COD 的去除率依然接近 90%,且植物生长良好。

3.3 湿地植物对重金属及有毒有害物质去除的研究

湿地植物还能吸附、富集一些有毒有害物质,如重金属铅、镉、汞、砷、钙、铬、镍、铜、铁、锰和锌等。研究发现,香蒲有很强的吸收和富集铅、锌的能力,净化塘 1 年生香蒲吸收铅为 2 502.18 mg/kg 以上,锌为 1 952.08 mg/kg,铜为 55.87 mg/kg,镉为 11.10 mg/kg,年净化铅为 20.52 t,锌为 18.91~22.45 t,铜为 0.34~0.41 t,镉为 0.23~0.27 t^[44]。Cheng 等^[45]用垂直流人工湿地处理低浓度重金属

污水的试验表明,风车草能吸收富集水体中 30%的铜和锰,对锌、镉和铅的富集也在 5%~15%。Ellis 等^[46]的研究结果表明,湿地中宽叶香蒲和黑三棱(*Spargnium sp.*)是摄取同化、吸附富集高速公路径流油类、有机物、铅和锌的较适宜植物种类。

3.4 其他方面的研究

湿地植物还可以促进农用有机化合物(如除草剂、杀虫剂等)及其他非农用有机化合物的降解来达到对受污染水体和土壤的生物修复。由于水生植物具有大面积的富脂性表皮,所以用以吸收亲脂性的有机氯农药完全可行^[47]。Aitchison 等用¹⁴C 研究了在水培和模拟土壤条件下,杂交杨对 1,4-二氧六环化合物的降解、去除效果,发现水培条件下杂交杨茎、叶可快速去除污染物,8 d 内平均清除量达 54%,但从模拟土壤中的清除较慢,18 d 仅有 24%。其途径皆是由蒸腾吸收后通过叶片表面产生气态挥发^[48]。Best 等^[49]报道,对受美国依阿华陆军弹药厂爆炸物所污染的地表水进行水生植物和湿地植物修复的筛选与应用研究中发现,杂属植物(*Myriophyllum aquaticum* Vell. Verdc)的效果甚佳。Roxanne 等^[50]研究了受 TNT 污染的地表水的植物修复技术,在质量浓度为 1、5、10 mg/kg 的土壤条件下,与对照相比,利用植物的降解、移除量可达到 100%。

4 人工湿地植物进一步研究的重点

围绕人工湿地开展的研究很多,但由于湿地的“黑箱效应”,人们对污水进入湿地系统后污染物的迁移转化机理与过程的认识尚不充分。大量的研究重在工程和实效,相比而言对机理性的探讨和研究则较为薄弱,栽植在人工湿地上的湿地植物更是如此。因此,为了更好地阐明湿地植物净化污水的机理,提高人工湿地污水处理效率,以下 4 个方面将成为今后进一步研究的重点:

(1) 继续进行湿地植物的种类选择及合理配置和资源化研究。由于不同植物种类在营养吸收能力、根系分布深度、氧气释放量、生物量和抗逆性等方面存在差异,所以在人工湿地中的净化作用并不相同。因此,要继续挖掘和筛选根系发达、耐污力强、净化效果好、经济和观赏价值高的人工湿地植物,同时要重视植物间的合理搭配,力求形成健康稳定的群落结构以利于提高对污染物的净化能力^[51]。还有,要加大对现有人工湿地植物的资源化和后续利用研究,防止二次污染。

(2) 加强对湿地植物生理生态的研究。人工湿地毕竟是种半自然或人造的生境,且频繁地受到人

为控制和强化的干扰影响。在这种条件下,湿地植物的光合、呼吸及其他代谢过程都与自然环境有较大的不同。如陆生花卉美人蕉,现广泛用于人工湿地的污水处理,与陆生环境(旱生)相比,其在湿生(潜流湿地)、淹水(表面流湿地)等不同类型的人工湿地条件下的存活、繁殖机制如何,目前仍未有报道。其次,尽管能作为人工湿地植物的C4植物为数不多,但同C3植物相比,在人工湿地这种水分不受限的条件下,其是否依然持有相对较高的C同化能力,其生理生态特征如气体代谢等与C3植物有无差异,而这方面的研究至今还不多见。故加强对湿地植物生理生态的研究,一方面探索维持湿地植物正常生长的代谢机制和调控规律,另一方面通过对一些环境因子的调控和改变来创建适宜的人工生态环境,最大发挥人工湿地系统的处理效能。

(3) 深入研究湿地系统中氧的供应与不同类型植物的输氧能力对基质中微生物生态环境的影响。与其他的生物处理系统一样,在以大型水生植物为核心的污水处理系统中,微生物对各种污染物的降解仍然起着重要的作用^[52],然而植物的生理代谢活动却直接关系到微生物对污染物的降解。

(4) 开展湿地植物—微生物界面相互作用以加速污染物降解的研究。由于植物根系的存在,增加了微生物的活动和生物量^[53]。植物根际分泌物刺激了细菌的转化作用,且在根区形成了有机碳,进而增加微生物对污染物的矿化作用。植物根际菌与植物形成共生作用,有其独特的酶途径,用以降解不能被细菌单独转化的有机物^[54]。所以,开展植物—微生物界面相互作用以加速水体污染物降解的研究必定是人工湿地污水处理技术的良好发展方向。

参考文献

- [1] 梁威,吴振斌. 人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展[J]. 环境科学动态,2000(3):32-37.
- [2] House C H. Combining constructed wetlands and aquatic and soil filter for reclamation and reuse of water[J]. Ecological Engineering,1999,12:27-38.
- [3] Gersberg R M, Elkins B V, Lyon S R, et al. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands[J]. Water Research,1986,20(3):363-368.
- [4] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? [J]. Water Science and Technology,1997,35(5):11-17.
- [5] Dusel C J, Pawlowski C W. Constructed wetlands offer flexibility[J]. Land and water,1997,41:27-28.
- [6] Geller G. Horizontal subsurface flow systems in the German speaking countries:summary of long-term scientific and practical experiences, recommendations[J]. Water Science and Technology,1997,35(5):157-166.
- [7] 贺锋,吴振斌. 水生植物在污水处理和水质改善中的应用[J]. 植物学通报,2003,20(6).
- [8] 朱斌,陈飞星. 利用水生植物净化富营养化水体的研究进展[J]. 上海环境科学,2002,21(9):564-567.
- [9] Haberl R, Perfler R, Mayer H. Constructed wetland in Europe [J]. Water Science and Technology,1995,32(3):306-315.
- [10] Bankston J L. Degradation of trichloroethylene in wetland microcosms containing broad-leaved cattail and eastern cottonwood[J]. Water research,2002,36:539-546.
- [11] Froend R H, Heddl E M, Bell D T. Effect of salinity and water-logging on the vegetation of Lake Toolbin Western Australia[J]. Australia Journal of Ecology,1987,12:281-298.
- [12] 靖元孝,杨丹菁,陈章和,等. 两栖榕在人工湿地的生长特性及其对污水的净化效果[J]. 生态学报,2003,23(3):614-619.
- [13] Keith G, Bolton E, Greenway M. Pollutant removal capability of a constructed Melaleuca wetland receiving primary settled sewage [J]. Water Science and Technology,1999,39(6):199-206.
- [14] 胡焕斌,周化民,王桂珍,等. 人工湿地处理矿山炸药污水[J]. 环境科学与技术,1997(3):17-19.
- [15] 杨丹菁,靖元孝,陈兆平,等. 水温对富营养化水体氮磷去除效果及规律研究[J]. 环境科学学报,2001,21(5):637-639.
- [16] 陈桂珠,陈桂葵,谭凤仪,等. 白骨壤模拟湿地系统对污水的净化效应[J]. 海洋环境科学,2000,19(4):24-26.
- [17] 廖新伟,骆世明,吴银宝,等. 风车草和香根草在人工湿地中迁移养分能力的比较研究[J]. 应用生态学报,2005,16(1):156-160.
- [18] Francis M M, Michael B J. Nutrient distribution in a papyrus swamp: Lake Naivasha, Kenya[J]. Aquatic Botany,1997,56:35-50.
- [19] 成水平,吴振斌,况琪军. 人工湿地植物研究[J]. 湖泊科学,2002,14(2).
- [20] Brix H. Functions of macrophytes in constructed wetland[J]. Water Science and Technology,1994,29(4):71-78.
- [21] 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.
- [22] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率[J]. 生态学杂志,2002,21(4):51-59.
- [23] 王宜明. 人工湿地净化机理和影响因素探讨[J]. 昆明冶金高等专科学校学报,2000,16(2):1-6.
- [24] Dorthe N J, Brian K S, Hans B. Growth and root oxygen release by *Typha latifolia* and its effects on sediment methanogenesis[J]. Aquatic Botany,1998,61:165-180.
- [25] Watson D. Hydraulic effects of aquatic weeds in U. K. rivers [J]. Regulate rivers,1987(1):211-227.
- [26] Brix H. Use constructed wetland in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives [J]. Water Science and Technology,1994,30(8):209-223.
- [27] Reddy K R, Debusk T A. State-of the art utilization of aquatic plants in water pollution control[J]. Water Science and Technology,1987,19(10):61-79.
- [28] 吴玉树,余国营. 根生沉水植物菹草对滇池水体净化作用[J]. 环境科学学报,1991,11:411-416.
- [29] 吴振斌,詹发萃,邓家齐,等. 综合生物塘处理城镇生活污水研究[J]. 环境科学学报,1994,14:223-228.
- [30] Gemma A, Juan M G, Ruben C, et al. Experimental and full-scale pilot plant constructed wetlands for municipal wastewater treatment[J]. Ecological Engineering,2003,21:43-52.
- [31] 高吉喜,叶春,杜鹃,等. 水生植物对点源污水净化效率研究[J]. 中国环境科学,1997,17(3):247-251.
- [32] 廖新伟,骆世明. 人工湿地对猪场废水有机物处理效果的研究[J]. 应用生态学报,2003,13(1):113-117.
- [33] Tanner C C, Nguyen M L, Sukias J P S. Nutrient removal by a constructed wetland treating subsurface drainage from grazed dairy pasture[J]. Agriculture Ecosystems and Environment,2005,105:145-162.
- [34] Heather L S, Mark E G, George T. Treatment of high-strength winery wastewater using a subsurface flow constructed wetland[J]. Water Environment Research,2001,73(4):394-403.
- [35] 唐述虞. 铁矿废水的人工湿地处理[J]. 环境工程,1996(4):3-7.
- [36] Trautmann N M. Use of artificial wetlands for treatment of municipal solid waste landfill leachate [C]// Hammer D A. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial, and Agricultural. Chelsea, MI: Lewis Publishers,1989:245-251.

浙江省生态功能区划研究

俞 洁 邵卫伟 于海燕 俞 建 胡尊英
(浙江省环境监测中心,浙江 杭州 310012)

摘要 在浙江省生态环境现状调查的基础上,运用 GIS 等先进技术,采用定性定量相结合的方法,对浙江省生态环境现状、生态环境敏感性和生态服务功能重要性进行评价,形成浙江省生态功能区划方案,将浙江省划分为 6 个生态区、15 个生态亚区、47 个生态功能区,并确定了具有重要生态系统服务功能的 5 个重要生态功能区。区划成果为浙江生态省建设规划的实施、资源的合理利用和工农业生产合理布局提供了科学依据。

关键词 生态功能区划 生态环境敏感性 生态系统服务功能 生态功能区

A case study of ecological regionalization for Zhejiang Province Yu Jie, Shao Weiwei, Yu Haiyan, Yu Jian, Hu Zunying. (Zhejiang Environmental Monitoring Center, Hangzhou Zhejiang 310012)

Abstract: Ecological regionalization of Zhejiang Province was carried out based on assessments of regional eco-environmental characteristic, eco-environmental sensitivity and eco-service significance. Qualitative and quantitative evaluations were performed on the survey data which were obtained using many advanced remote sensing, GIS, and space simulation techniques. Accordingly, Zhejiang Province was divided into 6 ecological regions, 15 sub-regions and 47 ecological function zones. Results of this study have provided a scientific basis for effective implementation of Planning of Zhejiang Ecological Province Construction, rational utilization of regional natural resources, and optimum allocation of agricultural and industrial production.

Keywords: Ecological regionalization Eco-environmental sensitivity Ecosystem service Ecological function zone

生态功能区划是根据区域生态环境要素、生态环境敏感性和生态服务功能空间分异规律,将区域划分为不同生态功能区的过程。生态区划概念最早是在 1976 年由美国生态学家贝利提出,认为区划是按照其空间关系来组分自然单元的过程。随着一系

列生态环境问题的出现,生态学家开始广泛应用生态区划与生态制图的方法与成果,阐明生态系统对全球变化的反应,分析区域生态环境问题形成的原因和机制,生态区划从而成为研究热点。

近年来,中国科学院学者进行了部分地区生态

第一作者:俞洁,女,1964 年生,硕士研究生,高级工程师,主要从事环境保护工作。

[37] 于少鹏,孙广友,秦素珍. 人工湿地污水处理技术及其在东湖水质净化中的运用[J]. 湿地科学,2004,2(3):228-233.

[38] Cooper P. The design and performance of a nitrifying vertical flow reed bed treatment system[J]. Water Science Technology,1997,35(5):215-221.

[39] Hosokawa Y, Horie T. Flow and particulate nutrient removal by wetland with emergent macrophyte[J]. Science Total Environment, Suppl.,1992:1271-1281.

[40] 袁东海,任全进,高士祥,等. 几种湿地植物净化生活污水 COD、总氮效果比较[J]. 应用生态学报,2004,15(12):2337-2341.

[41] 吴振斌,陈辉蓉,贺峰,等. 人工湿地系统对污水磷的净化效果[J]. 水生生物学报,2001,25(1):28-35.

[42] 诸惠昌,Stevens D K. 用人工湿地处理乳制品厂废水的研究[J]. 环境科学,1996,17(5):30-32.

[43] 骆世明. 人工湿地对猪场废水有机物处理效果的研究[J]. 应用生态学报,2002,13(1):113-117.

[44] 叶志鸿,陈桂珠,蓝崇钰,等. 宽叶香蒲净化塘系统净化铅锌矿废水效应的研究[J]. 应用生态学报,1992,3(2):190-194.

[45] Cheng S, Grosse W, Karrenbrock F, et al. Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals[J]. Ecological Engineering,2001,18(3):317-325.

[46] Ellis J B, Revitt D M, Shutes R B E, et al. The performance of vegetated biofilter for highway runoff control[J]. Science Total Environment,1994,146/147:543-550.

[47] 唐志坚,张平,左杜强,等. 植物修复技术在地表水处理中的应用[J]. 中国给水排水,2003,19(7):27-29.

[48] 刘世亮,骆永明,丁克强,等. 土壤中有有机污染物的植物修复研究进展[J]. 土壤,2003,35(3):187-192.

[49] Best E P H, Zappi M E, Fedrickson H L, et al. Screening aquatic and wetland plant species for phytoremediation of explosive-contaminated ground water from the Iowa army ammunition plant[J]. Ann. N. Y. Acad. Sci.,1997,829:179-194.

[50] Roxanne R, Medina V F, Larson S L, et al. Phytotreatment of TNT-contaminated ground water[J]. J. Soil Contamination,1998,7(4):511-529.

[51] 王圣瑞,年跃刚,侯文华,等. 人工湿地植物的选择[J]. 湖泊科学,2004,16(1):91-96.

[52] 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(2):36-40.

[53] Banks M K, Lee E, Schwab A P. Evaluation of dissipation mechanisms for benzo(a)pyrene in the rhizosphere of tall fescue[J]. J. Environment Quality,1999,28:294-298.

[54] Chaineau C H, Morel J L, Oudot J. Biodegradation of fuel oil hydrocarbons in the rhizosphere of maize[J]. J. Environment Quality,2000,29:569-578.

责任编辑:贺锋萍 (修改稿收到日期:2005-10-17)