

大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展

种云霄 胡洪营 钱 易

(清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084)

摘 要 大型水生植物在水污染治理中可以发挥多种作用。通过自身的生长代谢可以大量吸收氮、磷等水体中的营养物质,而其中一些种类还可以富集不同类型的重金属或吸收降解某些有机污染物;通过促进微生物的生长代谢,可以使水中大部分可生物降解有机物(BOD)降解;通过抑制低等藻类的生长,控制富营养化的表现形式等。根据不同的生活型特点,利用大型水生植物进行污水处理和水体修复的方式也多种多样,主要包括:以漂浮植物为主的塘系统和以挺水植物为主的人工湿地系统等。本文从生态功能发挥的角度探讨了植物对污染物降解的机理,并对以大型水生植物为核心的各种污水处理系统的研究进展与现状进行了综述,指出了利用大型水生植物进行水污染治理的研究与应用中存在的问题和发展方向。

关键词 大型水生植物 水污染治理

Advances in utilization of macrophytes in water pollution control

Chong Yunxiao Hu Hongying Qian Yi

(Environmental Simulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory,
Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Macrophytes can perform many ecological functions when they are used in water pollution control, including assimilating and storing nutrient elements such as nitrogen and phosphorus, transporting O_2 to the root zone, providing substrates for microbes, inhibiting growth of algae. Some of aquatic plants have special abilities to accumulate heavy metal elements or degrade organic contaminants. Many types of macrophyte-based treatment systems are developed depending on the difference of the life forms of the plants employed. Among them, pond systems using floating macrophytes and constructed wetlands culturing emergent plants are most commonly utilized. This review concentrates on advance of the macrophyte-based treatment technology. The mechanisms on pollutants removal and future research needs for macrophyte-based wastewater treatment systems are discussed.

Key words aquatic plant; wastewater treatment

1 引 言

大型水生植物是一个广泛分布在江河湖泊等各种水体中的高等植物类群,其生长的水塘或湿地很早就被利用来消纳污水。它们在水体中的生态功能使其在水污染防治中具有很大的应用价值。随着水污染的加剧,为了寻找高效低耗的水污染处理技术,20世纪70年代,水生植物开始受到人们的关注,许多这类植物的耐污及治污能力被研究发现,多种以大型水生植物为核心的污水处理和水体修复生态工程技术被开发。大量工程实践表明,这项技术具有低投资、低能耗等优点,因此近年来已成为环境领域

的研究热点之一。本文就大型水生植物的生态功能及其在水污染治理中的研究与应用进行了分析。

2 大型水生植物及其生态功能

大型水生植物是一个生态学范畴上的类群,是不同分类群植物通过长期适应水环境而形成的趋同性适应类型^[1],主要包括两大类:水生维管束植物和

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)基金项目(No. G1999045711)

收稿日期:2002-06-25;修订日期:2002-07-30

作者简介:种云霄(1974~),女,在读博士研究生,主要研究方向为水污染治理。

高等藻类。水生维管束植物(aquatic vascular plant)具有发达的机械组织,植物个体比较高大。通常具有4种生活型(life-form)^[2]:挺水(emergent)、漂浮(free-drifting)、浮叶(floating-leaved)和沉水(submergent)(表1)。

表1 大型水生植物的4种生活型

| 生活型 | 生长特点 | 代表种类 |
|------|-----------------------------|---------|
| 挺水植物 | 根茎生于底泥中,植物体上部挺出水面 | 芦苇、香蒲 |
| 漂浮植物 | 植物体完全漂浮于水面,具有特化的适应漂浮生活的组织结构 | 凤眼莲、浮萍 |
| 浮叶植物 | 根茎生于底泥,叶漂浮于水面 | 睡莲、荇菜 |
| 沉水植物 | 植物体完全沉于水气界面以下,根扎于底泥或漂浮于水中 | 狐尾藻、金鱼藻 |

大型水生植物可通过光合作用将光能转化为有机能,并向周围的环境释放氧气,在水生生态系统中处于初级生产者的地位,能够发挥多种生态功能,如:短期储存N、P、K等水体中的植物营养物质,净化水中的污染物,抑制低等藻类的生长和促进水中其他水生生物的代谢。与藻类相比,大型水生植物的特点是更易于人工操纵,即可通过人工收获将其固定的氮、磷带出水体。这些特点是利用大型水生植物进行污水处理,特别是针对湖泊富营养化治理的理论基础。

3 利用大型水生植物为主的生态系统处理污水的研究进展及现状

3.1 大型水生植物系统的运行方式

根据所利用的植物生活型不同,水生植物污水处理系统有3种基本方式:漂浮植物系统、挺水植物系统和沉水植物系统(表2)。

在这些系统中,植物处于核心地位,它的光合作用使系统可以直接利用太阳能;而植物的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,并且正是植物和这些生物的联合作用使污染物得以降解^[12],因此,这类系统通常被称为自然处理系统或人工生态处理系统。与传统的微生物处理方式相比,它的优势之处在于:低投资、低能耗、处理过程与自然生态系统有着更大的相融性等。缺点在于:处理时间长、占地面积大及受气候影响严重。

除单独使用外,这3种方式也经常组合应用或与其他处理工艺形成联合处理系统进行各类污水的处理。随着研究应用的深入,现在这些联合系统正在趋向于以水生植物为结合点,把污水处理和其他功能统一起来,使其扬长避短。如四川成都,为了处理受污染的府河水在岸边建造的活水公园^[13],其中的水生植物塘系统既营造了公园的主要景观,又可有效地进行污水的处理;中国科学院水生生物所在传统生物塘基础上改进的综合生物塘系统,则是把污水处理和水产养殖结合的一个尝试^[11];而加拿大约翰·托德教授的“活机器(living machine)”系

表2 大型水生植物污水处理系统^[3-11]

| 类型 | 使用方式或地点 | 处理范围 | 污染物去除机制 | 使用较多的种类 | 研究和应用情况 |
|--------|--------------|---------------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|
| 漂浮植物系统 | 强化氧化塘等类似的塘系统 | 城镇污水的二级或三级处理、某些工业废水、暴雨径流、受污染天然水 | 植物的吸收、微生物的代谢 | 凤眼莲、浮萍、大漂、水花生、满江红 | 设计简单,但工艺优化的研究较少,应用受制约 |
| 挺水植物系统 | 人工或天然湿地 | 城镇污水的二级或三级处理、工业废水、暴雨径流 | 微生物的代谢、植物吸收(以是否收割而定) | 芦苇、香蒲、灯心草、菰 | 研究应用最多,工艺设计已渐成熟 |
| 沉水植物系统 | 天然水体 | 沉水植被恢复、受污染水体修复 | 对氮、磷的短期储存、控制富营养化表现形式 | 水体原有种类 | 操作和实施难度较大,研究和应用较少 |

统,则把这一点做得更加完美,它通过把人工湿地处理和水产养殖综合系统封闭在温室内,使空间充分利用,既创造了一个高效的废水处理系统,也是水生动植物的资源输出系统^[14]。由此可见,因地制宜的综合利用,是以水生植物为主的污水处理方式发展的方向。

3.2 污染物的去除机制

3.2.1 植物吸收

被植物直接吸收的污染物包括两大类:(1)氮、磷等植物营养物质;(2)对水生生物有毒害作用的某些重金属和有机物。第一类被吸收后用以合成植物自身的结构组成物质,第二类则是脱毒后储存于体内或在植物体内被降解。

大型水生植物可以直接从水层和底泥中吸收氮、磷,并同化为自身的结构组成物质(蛋白质和核酸等),同化的速率与生长速度、水体营养物水平呈正相关,并且在合适的环境中,它往往以营养繁殖方式快速积累生物量,而氮、磷是植物大量需要的营养物质,所以对这些物质的固定能力也就非常高(表3)。由于大型水生植物的生命周期比藻类长,死亡时才会释放这些营养物质,因此,氮、磷在其体内的储存比藻类稳定,所以可通过在富含氮、磷等营养物质的污水中种养水生植物,达到使污水脱氮除磷的目的,同时又可收获生物资源。在这方面,由于易于收获并且生长速度快,漂浮植物凤眼莲和浮萍被研究和应用较多^[15]。大量的应用实践证明,尽管这些植物可以很容易地在污水中生长存活,但是要有效地利用污水中的氮、磷,只是随便的、任意的种植,达

不到预期的目的,需要对植物种群在污水中的增长规律、氮、磷的转化效率及合理的收获策略等关键因素进行深入研究,然后因地制宜地进行科学设计,才能得到预期的效果^[15,16]。

环境中的重金属和一些有机物并非是植物生长所需要的,并且达到一定程度后具有毒害作用,对于此类化合物,一些植物也演化出了特定的生理机制使其脱毒。植物通常是通过螯合和区室化等作用^[17]来耐受并吸收富集环境中的重金属,这种机制也存在于许多水生植物中,如重金属诱导就可使凤眼莲体内产生有重金属络合作用的金属硫肽^[18],这些机制的存在使许多水生植物可大量富集水中的重金属(表4)。

不同的有机物在植物体内有着不同的代谢机制,如酚类进入植物体后参与糖代谢,和糖结合生成酚糖苷,或被多酚氧化酶和过氧化物酶氧化而解除毒性^[19];凤眼莲具有直接吸收降解有机酚类的能力^[20],据报道,放养凤眼莲后水的酚去除效率比对照快2—3倍^[21];最近的研究发现,沉水植物狐尾藻等还具有直接吸收降解三硝基甲苯(TNT)的能力^[22]。酚及氰化物等在植物体内能分解转变为营养物质^[19],但是TNT在植物体内的降解机制尚不清楚,仍需进一步研究。

3.2.2 微生物降解

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。污水中可被生物降解的有机物(通常以BOD来表示)主要由于微生物的

表3 一些大型水生植物的氮、磷含量和生长率^[1,12]

| 植物种类 | 存储量 (t/hm ²) | 生长率 (t/hm ² /a) | 组织的氮含量 (g/kg 干重) | 组织的磷含量 (g/kg 干重) |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| 凤眼莲 | 20.0—24.0 | 60—110 | 10—40 | 1.4—12.0 |
| 大漂 | 6.0—10.5 | 50—80 | 12—40 | 1.5—11.5 |
| 浮萍 | 1.3 | 6—26 | 25—50 | 4.0—15.0 |
| 槐叶萍 | 2.4—3.2 | 9—45 | 20—48 | 1.8—9.0 |
| 香蒲 | 4.3—22.5 | 8—61 | 5—24 | 0.5—4.0 |
| 灯心草* | 22 | 53 | 15 | 2.0 |
| 镰草 | | | 8—27 | 1.0—3.0 |
| 芦苇 | 6.0—35.0 | 10—60 | 18—21 | 2.0—3.0 |
| 沉水植物* | 5 | | 13 | 3 |

* 平均值

表 4 典型大型水生植物的生长特点及其污染物去除潜力^[25-31]

| 植物种类 | 生长特点 | 污染物去除功能 |
|--------|-------------------|-----------------------------------|
| 凤眼莲 | 根系发达,生长速度快,分泌克藻物质 | 富集镉、铬、铅、汞、砷、硒、铜、镍等;吸收降解酚、氰;抑制藻类生长 |
| 大漂 | 根系发达 | 富集汞、铜 |
| 浮萍 | 生长速度快,分泌克藻物质 | 富集镉、铬、铜、硒;抑制藻类生长 |
| 紫萍、槐叶萍 | 生长速度快,分泌克藻物质 | 富集铬、镍、硒;抑制藻类生长, |
| 满江红 | 生长速度快,分泌克藻物质 | 富集铅、汞、铜 |
| 芦苇、香蒲 | 根系非常发达,生长速度快 | 去除 BOD、氮 |
| 石菖蒲 | 根系发达,分泌克藻物质 | 抑制藻类生长 |
| 狐尾藻 | 生长速度快 | 吸收 TNT、DNT 等结构相近化合物 |

代谢活动被去除^[23];氮的去除,尽管有植物的吸收,硝化和反硝化作用仍是主要的去除机制(约 40%—92%)^[12]。系统中水生植物根际区域为微生物代谢提供了所需要的微环境。水生植物为了满足淹没于水中根部的呼吸需要,可以通过体内发达的通气系统使氧从茎叶向根处转移,呼吸消耗剩余的氧气,就会直接释放到水中,在根区附近形成有氧环境;同时,根系也可以作为微生物附着的良好界面,植物的根系还可分泌一些有机物从而促进微生物的代谢,这样就为好氧微生物群落提供了一个适宜的生长环境,而根区以外则适于厌氧微生物群落的生存,进行反硝化和有机物的厌氧降解^[24]。因此,尽管微生物起着直接的作用,但植物的作用也是不可缺少的,植物的生理代谢活动直接关系到污染物的降解。

3.2.3 物理化学作用

处理系统中也有一小部分污染物通过物理化学作用被去除,主要有挥发、吸附和沉降。

综上所述,系统中大部分污染物的去除,植物都起了直接或间接的作用。而以往的研究对植物的关注较少,因此要提高处理效率,还需要对处理系统中植物自身的功能发挥及植物与微生物的关系进行深入研究。

4 植物种类选择与搭配

植物在处理系统中所起的功能在很大程度上决定了种类的选用,如主要去除对象是 BOD 和 N(反硝化)时,所选植物就需具备能为微生物提供附着界面的庞大根系以及较强的传氧能力;而当靠植物的吸收去除 N、P、重金属和某些有机物时,就需要选择具有较好的富集吸收能力并且生长速度快的种类;如果去除的污染物目标较多时就需要寻找能够有效发挥多种生态功能的种类,或不同生态功能类型

的种类搭配使用。另外,对当地气候的适应、植物的抗逆性及对病虫害的抵抗能力、植物管理的难易包括植物的后处理等也应给予考虑。

通过实验,国内外的研究人员已相继筛选出了一大批能够高效地去除水中各种污染物的植物(表 3 和表 4),这些种类有些已经用于实际的废水治理工程中,如凤眼莲、芦苇等应用在氧化塘和人工湿地中。但这些应用多着重于植物根部微生物功能的发挥,而主要靠植物自身的吸收功能来进行废水处理的应用还较少,主要是由于对植物吸收污染物后的生长规律及对生物量的资源化利用缺少深入的研究。

5 结束语

当前,以活性污泥为主的污水处理系统,无论二级处理还是深度处理投资费用都比较高,而且由于需要大量电能,运行费用也相当高,以致于一些经济不发达的国家和地区难以承受。大型水生植物为主的污水处理系统,主要由太阳能来驱动,并且在污水进行深度处理的同时,还可以回收资源和固定能源,加之处理过程基本不使用化学品,也不会产生有害副产物,是一种非常有潜力的“绿色”处理技术。因此,随着研究的深入和技术的不断完善,以大型水生植物为主的污水处理与水体修复技术,将会得到越来越广泛应用。

参考文献

- [1] 倪乐意. 大型水生植物. 刘健康主编. 高级水生生物学. 北京:科学出版社,1999,224—241
- [2] 颜素珠. 中国水生高等植物图说. 北京:科学出版社,1983
- [3] 艾尔肯 热合曼等. 利用水浮莲净化酿酒业废水的技术

- 与实践. 环境科学与技术, **1993**, 72(2):39—44
- [4] 曹向东等. 强化塘-人工湿地复合生态系统中氮磷的去除规律. 环境科学研究, **2000**, 13(2):5—19
- [5] 黄韵珠等. 植物学净化塘处理油漆废水的实验研究. 兰州大学学报(自然科学版), **1995**, 31(2):127—132
- [6] Allinson G. Stagnitti F. Colville S. Growth of floating aquatic macrophytes in alkaline industrial wastewaters. J. Environ. Eng., **2000**, 12:1103—1107
- [7] 李卫平, 王军等. 应用水葫芦去除电镀废水中重金属的研究. 生态学杂志, **1995**, 14(4):30—35
- [8] 倪乐意, 李纯厚, 黄祥飞. 在富营养型水体中重建沉水植被的研究. 刘健康主编. 东湖生态学(二). 北京:科学出版社, **1995**, 302—310
- [9] John T., Beth J. The design of living technologies for waste treatment. Ecological Engineering, **1996**, 6(1):109—136
- [10] Busk T. A. De, Williams L. D., Ryther J. H. Removal of nitrogen and phosphorus from wastewater in a water hyacinth based treatment system. J. Environ. Qual., **1985**, 12(2):257—262
- [11] 吴振斌, 詹发萃, 邓家齐, 陈锡涛. 综合生物塘处理城镇污水研究. 环境科学学报, **1994**, 14(2):223—228
- [12] Reddy K. R., Debusk T. A. State-of-the art utilization of aquatic plants in water pollution control. Wat. Sci. Tech., **1987**, 19(10):61—79
- [13] 王庆安, 任勇, 钱骏, 黄时达. 人工湿地塘床系统净化地表水的试验研究. 四川环境, **1995**, 19(1):9—15
- [14] 朱莉. 斯托弗著(张康生, 韩建国译). 水危机. 北京:科学出版社, **2000**
- [15] 黄玉瑶. 内陆水体污染生态学. 北京:科学出版社, **2001**, 265—267
- [16] 钦佩, 安树青, 颜京松. 生态工程学. 南京:南京大学出版社, **1998**, 75—81
- [17] 王剑虹, 麻密. 植物修复的生物学机制. 植物学通报, **2000**, 17(6):504—512
- [18] 王英彦, 熊易, 铁锋. 用凤眼莲根内金属硫肽检测重金属污染的研究. 环境科学学报, **1994**, 14(4):421—438
- [19] 潘瑞炽, 董愚得. 植物生理学. 北京:高等教育出版社, **1984**, 148
- [20] 赵大君, 郑师章. 无菌凤眼莲的降酚研究. 生态学杂志, **1994**, 13(3):25—29
- [21] 谭常. 凤眼莲净化含酚废水的研究. 环境科学学报, **1986**, 17(1):71—76
- [22] Joseph B., Hughes J. Transformation of TNT by aquatic plants and plant tissue cultures. Environ. Sci. Technol., **1997**, 31(1):266—271
- [23] Sherwood C., Reed Ronald W. Crites E. Joe Middlebrooks, Natural systems for waste management and treatment, New York:Mcgraw-Hill. Inc., **1995**
- [24] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理. 环境科学, **1995**, 16(3):83—86
- [25] Pilorr-Smits E. A. H., de Souza M. P., Hong G. Volatilization and accumulation by twenty aquatic plant species. J. Environ. Qual., **1999**, 128(3):1011—1018
- [26] Qian J. H., Zayed A., Zhu Y. H. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: Uptake and accumulation of ten trace elements by twelve plant species. J. Environ. Qual., **1999**, 28(5):1448—1455
- [27] Srivastav R. K., Gupta S. K., Nigam K. D. P. Treatment of chromium and nickel in wastewater by using aquatic plants. Wat. Res., **1994**, 28(7):1631—1638
- [28] 叶居新, 何池全, 陈少凤. 石菖蒲的克藻效应. 植物生态学报, **1999**, 23(4):379—384
- [29] 俞子文, 孙文浩, 郭克勤, 余树文. 几种高等水生植物的克藻效应. 水生生物学报, **1992**, 16(1):1—7
- [30] Zayed A., Gowthaman S., Terry N. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: Duckweed. J. Environ. Qual., **1998**, 27(3):715—721
- [31] Zhu Y. L., Zayed A. M., Qian J. H. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: Water hyacinth. J. Environ. Qual., **1999**, 28(1):339—344

(责任编辑:刘颖)