

# 水生植物在污水处理和水质改善中的应用

贺 锋 吴振斌

(中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室 武汉 430072)

**摘要** 介绍了水生植物在污水治理中的应用。通过与其他方法的比较,说明了水生植物净化法有其独特的优点。分别阐述了低等植物藻类及高等水生植物净化污水的应用类型、方式,应用范围及净化机理,还对高等水生植物的选取标准作了描述。指出了该方法使用的可行性,并对其应用前景作出了展望。

**关键词** 污水治理,应用类型,水生植物,净化机理

## Application of Aquatic Plants in Sewage Treatment and Water Quality Improvement

HE Feng WU Zhen-Bin

(State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072)

**Abstract** This paper introduces application of aquatic plants in sewage treatment. Compared with other methods, aquatic plant purification method shows unique feature. The application type, application scope and purification mechanism of sewage treatment with algae and macrophytes are described respectively, and the selection standards of macrophytes are also given here. The application feasibility has been laid out, and its application in future has been prospected too.

**Key words** Sewage treatment, Application type, Aquatic plants, Purification mechanism

水污染是一个世界性问题,它会导致水资源的可利用性能降低,自然水生态系的逐渐退化。我国是水资源短缺的国家,全国 600 多个城市目前大约有一半的城市缺水,而水污染使得水环境形势显得更为严峻。70 年代以来,许多江、河、湖泊、水库的水质一直在下降。日趋严重的水污染不仅降低了水体的使用功能,还进一步加剧了水资源的短缺,对我国正在实施的资源可持续利用战略带来了严重的负面影响,尤其严重地威胁到城乡居民的饮水安全和人民群众的身体健康。

传统的生化二级处理是污水处理中用得较广泛的技术,虽然其工艺成熟、处理效果理想,但建造、运行、管理费用过高。此外,对于污水的处理,通常还有化学法(如加入硫酸铜等)和换水法等,虽然均有一定效果,但化学法易产生二次污染;换水法不够方便、经济,且仅适宜于小型水体。目前,越来越多的专家与学者关注生物学处理法,尤其是水生、湿生植物处理法。它不仅能起到净化水的作用,还能改善生态环境,促进退化水生态系的恢

中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-102);国家杰出青年科学基金(39925007);武汉市晨光计划(20025001035);中国科学院水生生物研究所研究领域前沿课题;湖北省科技攻关项目资助。

通讯作者:贺锋,男,1973年生,助理研究员,在职博士,现从事水污染生物工艺学研究。吴振斌,男,1956年生,研究员,博士生导师,国家杰出青年基金获得者,欧盟项目评委,发表论文100余篇。

收稿日期:2002-09-17 接受日期:2002-11-25 责任编辑:崔郁英

复。

## 1 低等植物——藻类在水处理中的应用

藻类污水处理法具有净化效率高、系统建造运行费用低等特点。另外,处理后产生的沉积物(主要是死藻)干燥后还可作为很好的肥料和鱼饲料添加剂,由于藻类在污水净化过程中产生大量的氧气,可减少水体因缺氧而形成的恶臭气味。因此,用藻类处理污水在水质的改善中得到越来越广泛的应用(彭清涛,1998)。

### 1.1 常见应用类型

**1.1.1 藻类塘** 氧化塘的研究是利用藻菌共生系统,使藻类等对营养物的分解和利用来达到处理污水的目的(李穗中,1991)。综合生物塘技术的出现使得中等城镇进行污水综合治理有了可能,其中藻类系统单元就起到了相当重要的作用(王德铭等,1990;夏宜铮等,1993)。

**1.1.2 活性藻** 通过人工强化培养高浓度藻类,可缩短处理时间,因其具有良好的沉降性能,便于收获、出水澄清等特点,目前国外已有利用活性藻处理污水的实例(Aziz and Ng,1993),况琪军和谭渝云(2001)证实了该方法的可行性。

**1.1.3 固定化藻** 通过人工调控以满足藻类生长所需的最佳环境条件,超浓度的密集藻类培养,利用载体通过物理或化学方法将藻类细胞固定,形成固定化藻类系统的高效生物反应器,克服了传统藻类污水处理系统停留时间长、占地面积大、处理效率不稳定的缺陷。还具有藻细胞浓度高、易于收获等优点。固定分为吸附法和包埋法,载体通常为褐藻酸钙、角叉菜聚糖、琼脂、聚丙烯酰胺、多孔硅胶、聚乙烯和聚氨基甲酸酯泡沫等。近年来固定化藻研究取得了显著成绩(严国安等,1993;1995;严国安和李益健,1994)。

### 1.2 应用范围和去除污染物种类

藻类污水处理法应用范围广泛,不仅可用于治理生活污水,还可用于治理其他类型废水(Noue and Ni-Eidhin,1988;Rodrigues *et al*,1987;Przytocka,1984)。在南非开普敦附近的一个污水处理场,采用一面积为 1 000 m<sup>2</sup> 充满螺旋藻的水池,成功地处理着 1 000 人产生的生活污水。在纳米比亚和德兰士瓦等地的多家制革厂利用螺旋藻处理生产废水。Semple 和 Cain(1996)应用丹麦赭球藻成功处理含苯酚工业废水。藻类除对污水中的氮、磷等营养物有明显的去除效果外,对其他有机物和重金属亦有较强的富集和去除作用。

**对营养物的去除** Tam 和 Wong(1989)将小球藻和栅藻分别培养在一级处理出水和二级处理出水中,结果表明,两种藻类在一级处理水中生长得较好,对氮、磷的去除率在培养一周后即达到 70% 以上。Govindan(1984)在利用藻类处理混合污水时发现,除了氮磷被大量去除外,BOD(生物需氧量)和 COD(化学需氧量)也减少了 90%。

**对重金属的去除** Soeder(1978)认为,空星藻在温度为 23 ℃ 时,20 h 后从含铅 1 mg/L 溶液中吸收 100% 的铅,在温度为 30 ℃ 时,仅 1.5 h 就能从溶液中吸收 90% 的铅,对镉的吸收效率要低一些,24 h 后仅从 40 mg/L 镉溶液中吸收 60% 的镉。杨红玉和王焕校(1990)认为在低于 0.5 mg/L 浓度的镉溶液中,绿藻能有效吸收镉,此时的富集系数也最大。

**对有机物的去除** Hssetti(1988)认为单种藻类对 BOD 的去除比单种细菌或原生动物

更有效,其中普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)对BOD的去除率可达到83%。林毅雄(1984)通过斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)、策哈衣藻(*Chlamydomonas reinhardi*)和普通小球藻对丙体-666有机农药的去除效果表明,当污水中丙体-666浓度为1 mg/L时,处理时间从0.5 h至96 h,丙体-666的残留量为0.4943~0.3193  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ,藻体内的富集量为34.65~33.73  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。Maguire(1987)对金属有机物净化的研究发现,纤维藻能在25  $\mu\text{g}/\text{L}$ 的三丁锡中生长,并能将三丁锡降解为二丁锡、单丁锡和无机锡。邓星明等(1982)利用藻菌生物膜净化炼油废水发现,坑形席藻能去除正十四烷。刘厚田等(1993)证明,在藻菌共生系统中,藻类也能单独降解偶氮染料。

## 2 高等植物——水生维管束植物在水处理中的应用

水生维管束植物有33科,124属,1000余种。按生态类型,可分为湿生植物、挺水植物、浮叶植物、飘浮植物和沉水植物。已经发现其中很多种类对有机污染和重金属污染具有很强净化能力(蒋志学和邓士谨,1989)。

### 2.1 应用方式

**2.1.1 沉水植物净化系统** 沉水植物可以提高水体透明度,增加水体溶解氧,降低氮磷营养物含量。沉水植物系统的存在有利于湖泊富营养化的防治(宋碧玉等,1999)。吴玉树和余国营(1991)发现,菹草(*Potamogeton crispus* L.)对富营养化和重金属污染的水体和底泥可起到一定的净化作用。金送笛等(1994)认为,菹草对氮磷有较强的吸收能力,能在一定程度上减轻水体的营养负荷。通过野外生态围隔沉水植物恢复试验发现,在植被恢复后围隔水体自净能力大大加强(邱东茹和吴振斌,1997;邱东茹等,1997;Qiu *et al.*, 1997)。

**2.1.2 综合生物塘系统** 利用综合生物塘处理污水已有不少报道(Wu *et al.*, 1993a, 1993b, 1994)。在污水稳定塘的基础之上,将多种大型水生植物塘单元有机组合,形成综合生物塘。其中植物仍然起着重要的作用。吴振斌等(1994)采用漂浮植物塘、挺水植物塘和藻菌共生塘的串联系统可有效地净化城镇污水。王国祥等(1998)采用漂浮、浮叶及沉水植物塘相间连接,较理想地实现了对太湖局部水域水质的改善。阮宜纶等(1994)用三棱草塘、芦苇塘、香蒲塘和水葫芦塘的串联系统有效地处理了地热尾水。吴玉树等(1988)利用不同种类维管束植物塘组合在滇池局部区域的研究发现,该综合生物系统对污水和底泥都有一定的净化效果。

**2.1.3 湿地系统** 利用湿地系统净化污水,目前已发展成为一种完备和独立的污水处理技术(Cale *et al.*, 1993;朱彤等,1991;吴振斌等,2001a; 2001b; 2001c;贺锋等,2002)。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与作用。大型水生植物是湿地生态系统一个不可分割的组成部分。它在该污水处理系统中起着关键的作用,主要表现在以下几个方面:牢固湿地床表面,为物理过滤提供良好条件;形成隔离层,在冬季可防止霜雪直接冻结湿地表面;给根区微生物及部分野生生物提供良好生境;通过根系的输氧作用改善系统中的生物地化循环;吸收部分营养物质,降低污染负荷;改善景观等。

**常规天然湿地系统** 湿地是处于陆地和水生生态系统之间的转换区,通常其地下水

位达到或接近地表,或者处于浅水淹没状态,以周期性的水生植物生长为优势,底层以排水不良的水成土为主,并且在每年生长季的部分时间水浸或水淹,它包括沼泽地、湿原、泥炭地、浅水湖泊等(陈宜瑜,1995)。植物的有无是界定湿地的重要条件之一。通常天然湿地可作为废水净化缓冲区、野生动物栖息地,具有生物多样性保护等功用。

**特殊天然湿地系统——红树林** 红树林虽属于自然湿地系统的一种,具有其特殊性:

是热带和部分亚热带沿海潮间带滩涂上特有的木本植物群落,属于长绿阔叶林;典型分布于南北回归线之间,最南至南纬 33 度,最北至北纬 32 度。红树林有许多经济价值及生态效应,可净化污水、改善水质(陈映霞,1995)。其具有潜在的污水净化能力,已越来越被人们作为污水和废水排放的便利场所(黄立南等,2000)。红树林沼泽对稀释的有机废水具有较强的净化潜力(Dwivedii and Padkumar,1983),红树林的底泥可作为重金属的沉积地(Tam and Wong,1995)。

目前,对红树林湿地污水处理系统的研究已越来越广泛开展(陈桂珠等,1996;缪绅裕和陈桂珠,1999;章金鸿等,1999)。

**人工湿地系统** 是指人为构筑的湿地系统,多用于污水处理。自德国 1974 年首先建造人工湿地以来,该工艺相继在欧洲、美国和加拿大等国得到推广应用。目前欧洲已有数以百计的人工湿地投入废水处理运行,这种人工湿地的规模大小差别很大,小的可为单个家庭处理排放的废水,大的可以处理千人以上村镇排放的污水及大中型湖泊水质的改善。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场的 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外,也能广泛应用于农业、畜牧业、食品、矿山等工农业废水的处理。自 20 世纪 70 年代以来,湿地系统发展迅速。据统计捷克共和国到 1995 年止已建起了 39 个人工湿地,美国在 1988 年至 1993 年间就建起了几百个人工湿地。我国对人工湿地的研究开始较晚,直到“七五”期间才开始了较大规模的研究。1990 年 7 月,国家环保局华南环保所在深圳白泥坑建造了处理规模为 3 100 m<sup>3</sup>/d 的人工湿地示范工程,此外,在北京昌平和天津等地也先后建立了人工湿地系统,并对人工湿地处理污水规律进行了比较系统的研究。

## 2.2 应用范围

高等植物不仅可用于生活污水的处理,还可应用于行业废水的处理。吴振斌等(1987a,1987b)用凤眼莲(*Eichhornia crassipes* (Mart) Solms)净化石化废水,郑瑛和李晖(1996)用香蒲(*Typha latifolia* L.)净化矿山废水,夏汉平(2000)用香根草(*Vetiveria zizanioides*)和水花生净化垃圾污水,钱明浩等(1997)用雍菜-多花黑麦草净化浸出油厂废水,艾尔肯热合曼(1996)利用水浮莲净化酿酒废水,杨凤江和李立明(1996)用水葫芦和细绿萍(*Azolla imbricata*)净化淀粉废水,曾健等(1997)用水葫芦、水浮莲和浮萍净化高能液体燃料废水,胡焕斌等(1997)用芦苇床处理铁矿炸药污水,吴振斌等(2000)用芦苇和香蒲床处理藻毒素水体,均取得良好效果。

## 2.3 高等净化植物选取的标准

**净化能力:**所选取的植物必须具有一定的净化能力,这是关键,亦是目的之所在。

**抗逆性:**包括耐污能力和抗虫害能力。 **引种及管理难易:**所选取的植物应该是易于引

种,最好是当地种,另外应该是管理简单、方便。综合利用价值:资源化程度高,即植物便于再利用,如用作饲料、肥料、沼气、药材等。美化景观:特别是用于城镇污水处理,由于其地处城区或市郊,故美化景观亦是相当重要的。

### 3 净化机制

#### 3.1 对营养物的去除

营养物质是藻类生长的限制因子之一,但藻类生长良好,对氮磷营养物质去除效率也高。藻类对营养物质去除取决于污水中营养物质浓度、氮磷比例和营养物利用度及藻细胞内营养物浓度等。对氮的去除,一般为吸收利用,且优先吸收氨氮和其他还原态氮,由于藻类不产生活性硝酸还原酶,它对硝态氮的吸收仅仅发生在氨氮浓度极低或耗尽时。对磷的去除通常受 N/P 比影响,当污水中氮浓度高而磷浓度低时,藻类对磷的去除率升高,反之,藻类对磷的去除率下降。适宜比值在  $N/P = 7 \sim 15/1$  (Reynolds, 1984)。对于高等植物来说,营养物质是它们重要的生长基础,通过吸收将其转化为自身的组分。许多水生维管植物的生长速度很快,能吸收大量的氮、磷、钾等营养元素,如每公顷凤眼莲每年可吸收氮 1 989 kg,磷 322 kg,钾 3 188 kg;香蒲每年每公顷可吸收氮 2 630 kg,磷 403 kg,钾 4 570 kg。利用水生维管植物亦可防治水华出现,在治理富营养化方面可收到一定效果。

#### 3.2 对重金属的去除

藻类对重金属的去除取决于光照、温度、pH、重金属浓度及其化学形态、其他离子和螯合剂的有无及水硬度等物理、化学因素。通常认为藻类去除重金属的过程分为吸附和转移两个阶段。吸附的途径很多:重金属与藻细胞表面的负电荷反应点(一般为多糖类)的结合发生吸附;转移是一种主动运输的过程,需要代谢提供能量(严国安等,1995)。高等植物对重金属去除主要是吸收,如铅、镉、砷、汞、铬等可被植物吸收,之后多以金属螯合物的形式蓄积于植物体内的某些部位(蒋志学和邓士谨,1989)。

#### 3.3 对有机物的去除

污水中有机物可为藻类生长提供重要的碳源。藻类对有机物的去除主要是通过富集和降解。对于不同藻类,不同污染物其富集机制亦不相同(严国安等,1995)。水生维管植物对有机污染物的净化包括附着、吸收、积累和降解等。水生维管植物可以其巨大的体表吸附大量有机物,相对减少水中有机物的浓度,尽管这不能根本消除有机物的存在,还随时可能将其释放到水中,但在一个相对时间内,还是可以起到净化作用的(蒋志学和邓士谨,1989)。

水生维管植物对有机污染物的净化效果明显。茭白、慈菇对城市污水 BOD 的去除率可达 80% 以上。芦苇、香蒲、眼子菜和凤眼莲等可去除石油废水的有机污染物达 95% 以上。水葱可使食品厂废水中 COD 降低 70% ~ 80%,使 BOD 降低 60% ~ 90%。盐生灯心草、灯心草和水葱等对酚的净化能力都很强,100 g 植物在 100 h 之内对酚的吸收分别为 204 mg/L, 230 mg/L 和 202 mg/L。

一些水生维管束植物对有机农药的净化能力也很强。当水中 DDT 浓度为 0.445  $\mu\text{g/L}$  时,眼子菜体内浓度达 1.0 mg/L,富集系数为 2 220,水中 DDT 浓度为 2.1 mg/L 时,富集系数可达 3 500。水中 DDT 浓度为 0.30  $\mu\text{g/L}$  时,蓼属植物体内浓度可达 30.3 mg/L,富集系数为 10 万。水生维管束植物对富营养化水体中的藻类除了发生光照、营养、生存空间的

竞争外,还存在着相生相克作用,即一种植物通过向环境释放某些化学物质,在其周围形成一个微环境区域,从而影响该区域内藻类生长的现象(贺锋,1999)。

#### 4 小结

采用植物净化污水,较符合我国的国情。它不仅投资少,运行费用低,还有以下优点:(1)处理污水中营养物质(N、P)及其他污染物等方法简单,易操作;(2)植物资源可回收再利用,并获得一定经济效益;(3)环境扰动少;(4)有较高美化环境价值易为社会接受。

当然,它也有不足之处:1.植物系统易遭虫害,应注意防虫;2.植物的枯枝败叶易造成营养释放,应注意及时清理,另外植物死亡后应该及时补栽;3.在冬季多数植物地上部分枯死,净化效果有所降低;4.植物净化系统一般占地面积较大。

如果我们充分发挥其优点,弥补或避免其不足,合理进行利用,那么植物净化在发展中乃至发达国家的应用应该具有广阔的前景。

#### 参 考 文 献

- 王国祥,濮培民,张圣照,李万春,胡维平,胡春华,1998.人工复合生态系统对太湖局部水域水质的净化作用.中国环境科学,18:410~414
- 王德铭,张甬元,邓家齐,吴振斌,1990.城市污水稳定塘设计手册.北京:中国建筑工业出版社
- 邓星明,詹发萃,邓亚农,1982.一种降解石油烃的淡水藻类-坑形席藻.植物学报,24:548~553
- 艾尔肯热合曼和阿布都克里木热合曼,1996.利用水浮莲净化酿酒业污水的技术及其实践.环境科学与技术,73(2):41~45
- 朱彤,许振成,胡康萍,马桂花,李华,1991.人工湿地污水处理系统应用研究.环境科学研究,4(5):17~22
- 阮宜伦,林荣忱,张建国,1994.地热水对环境影响及污染防治.中国给水排水,10(6):12~16
- 李穗中编著,1991.氧化塘污水处理技术.北京:中国环境科学出版社
- 刘厚田,杜晓月,刘金齐,邹晓燕,柳若安,1993.藻菌系统降解偶氮染料的机理研究.环境科学学报,13:332~338
- 严国安,李益健,1994.固定化小球藻类净化污水的初步研究.环境科学研究,7(1):39~43
- 严国安,李益健,唐赢中,1993.水生植物系统对污水处理及其设计探讨.环境工程,11(2):16~24
- 严国安,李益健,王志坚,1995.固定化栅藻对污水净化及其生理特征的变化.中国环境科学,15(1):10~13
- 严国安,谭智群,1995.藻类净化污水的研究及其进展.环境科学进展,3(3):45~54
- 杨红玉,王焕校,1990.某些绿藻对镉的富集作用及其毒性反应.环境科学学报,10(1):64~72
- 杨凤江,李立明,1996.利用水生植物治理淀粉废水.环境保护科学,22(2):24~26
- 邱东茹,吴振斌,1997.富营养化浅水湖泊沉水水生植物的衰退与恢复.湖泊科学,9(1):82~88
- 邱东茹,吴振斌,刘保元,严国安,马剑敏,1997.武汉东湖水生植被的恢复试验研究.湖泊科学,9(2):168~174
- 吴玉树,李森林,1988.水生维管束植物对滇池水体的净化效应.生态学报,8:347~352
- 吴玉树,余国营,1991.根生沉水植物菹草对滇池水体净化作用.环境科学学报,11:411~416
- 吴振斌,丘昌强,夏宜铮,王德铭,1987a.凤眼莲净化燕山石油化工废水的研究 I.动态模拟试验.水生生物学报,11:139~150
- 吴振斌,夏宜铮,丘昌强,王德铭,1987b.凤眼莲净化燕山石油化工废水的研究 II.静态净化试验.水生生物学报,11:299~309
- 吴振斌,詹发萃,邓家齐,陈锡涛,夏宜铮,张甬元,1994.综合生物塘处理城镇污水研究.环境科学学报,14:223~228
- 吴振斌,陈辉蓉,雷腊梅,宋立荣,付贵萍,金建明,贺锋,何振荣,2000.人工湿地系统去除藻毒素研究.长江流域资源与环境,9:242~247
- 吴振斌,陈辉蓉,贺锋,成水平,付贵萍,金建明,邱东茹,2001a.人工湿地磷的去除研究.水生生物学报,25:28~35
- 吴振斌,任明迅,付贵萍,贺锋,2001b.垂流人工湿地水力学特点对污水净化效果的影响.环境科学,22(5):45~49
- 吴振斌,梁威,成水平,贺锋,付贵萍,陈辉蓉,邓家齐,詹发萃,2001c.人工湿地植物根区土壤酶活性与污水净化效果及

其相关分析. 环境科学学报, 21:622~624

- 况琪军, 谭渝云, 2001. 活性藻系统对氮磷及有机物的去除研究. 中国环境科学, 21(3):23~29
- 宋碧玉, 王健, 曹明, 戴莽, 1999. 利用人工围隔研究沉水植被恢复的生态效应. 生态学杂志, 18(5):21~24
- 陈宜瑜编著, 1995. 中国湿地研究. 长春:吉林科技出版社
- 陈桂珠, 缪绅裕, 黄玉山, 谭凤仪, 1996. 人工污水中的 N 在模拟秋茄湿地系统中的分配循环及其净化效果. 环境科学学报, 16:44~49
- 陈映霞, 1995. 红树林的环境生态效应. 海洋环境科学, 14(4):51~56
- 郑瑛, 李晖, 1996. 香蒲植物净化塘对矿山废水的净化效益. 中山大学学报论丛, 2:169~171
- 金送笛, 李永函, 倪彩虹, 王斌, 1994. 菹草对水体中氮磷的吸收及若干影响因素. 生态学报, 14:168~173
- 林毅雄, 1984. 莱茵衣藻和小球藻对丙体 666 的富集和降解研究. 中国环境科学, 4(2):15~21
- 贺锋, 1999. 植物间的相生相克. 植物学通报, 16:19~27
- 贺锋, 吴振斌, 付贵萍, 陈辉蓉, 成水平, 熊丽, 邱东茹, 金建明, 李玉元, 2002. 复合构建湿地运行初期理化性质及氮的变化. 长江流域资源与环境, 11:279~283
- 胡焕斌, 周化民, 王桂珍, 冯俐, 谢其明, 1997. 人工湿地处理矿山炸药污水. 环境科学与技术, 78(3):17~18
- 夏汉平, 2000. 香根草和水花生对垃圾污水中 N、P、Cl 的吸收效果. 植物生态学报, 24:613~616
- 夏宜铮, 张甬元, 邓家齐, 陈锡涛, 吴振斌, 1993. 综合生物塘技术及黄州城区污水综合生物塘处理研究. 北京:科学出版社
- 钱明浩, 顾黎霞, 沐小龙, 1997. 水面栽培菹菜-多花黑麦草净化浸出油厂废水初步研究. 安徽师大学报, 20:264~268
- 黄立南, 蓝崇钰, 束文圣, 2000. 污水排放对红树林湿地生态系统的影响. 生态学杂志, 19(2):13~19
- 章金鸿, 李玫, 陈桂珠, 1999. 红树林湿地对榨糖废水中 N、P 的吸收和净化可能性. 重庆环境科学, 21(6):39~41
- 曾健, 徐婉琴, 虞登洋, 石建德, 1997. 水生植物净化三胍污水的研究. 环境污染与防治, 19(4):17~20
- 蒋志学, 邓士谨编, 1989. 环境生物学. 北京:中国环境科学出版社
- 彭清涛, 1998. 植物在环境污染治理中的应用. 污染防治技术, 20(2):24~27
- 缪绅裕, 陈桂珠, 1999. 模拟秋茄湿地系统中镍、铜的分布积累与迁移. 环境科学学报, 19:545~549
- Aziz M A, Ng W J, 1993. Industrial wastewater treatment using an activated algae-reactor. *Water Sci Technol*, 28(7):71~76
- Dwivedii S N, Padkumar K G, 1983. Ecology of a mangrove swamp near Juhu beach, Bombay with reference to sewage pollution. In: H J Teas ed, *Biology and Ecology of Mangroves*. Lancaster: Dr W Junk Publishers.
- Gale P M, Reddy K R, Graetz D A, 1993. Nitrogen removal from reclaimed water applied to constructed and natural wetland microcosms. *Water Environ Res*, 65(2):162~168
- Gvindan V S, 1984. Treatment on mixed wastewater by algae. *Asian Environ*, 1:7~15
- Hsetti B B, 1988. Application of microorganism on wastewater treatment. *Environ Ecol*, 6:508~517
- Maguire R, 1987. Removal of organic compounds in wastewater. *Appl Organomet Chem*, 1:475~482
- Noue J, Ni Eidhin D, 1988. Improved performance of intensive semicontinuous culture of *Scenedesmus* by biomass recirculation. *Biotechnol Bioeng*, 31:397~401
- Przytocka J M, 1984. Intensive culture of *Chlorella vulgaris*/AA as the second stage of biological purification of nitrogen industry wastewaters. *Water Res*, 18(1):1~7
- Qiu D R, Wu Z B, Yan G A, Li Y J, Zhou Y J, 1997. Study of the ecological restoration of aquatic macrophytes in a eutrophic shallow lake. *Chinese J Oceanog Limnol*, 15(1):52~60
- Reynolds C S, 1984. *The Ecology of Freshwater Phytoplankton*, Cambridge: Cambridge University Press
- Semple K T, Cain R B, 1996. Biodegradation of phenols by the alga *Ochromonas danica*. *Appl Environ Microb*, 62(4):24~32
- Soeder C J, 1978. Studies on heavy metals purification by employing algae. *Mitt Internat Verein Limnol*, 21:575~583
- Tam N F Y, Wong Y S, 1989. Wastewater nutrient removal by *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus* sp. *Environ Pollut*, 58:19~26
- Tam N F Y, Wong Y S, 1995. Mangrove soils as sinks for wastewater-borne pollutions. *Hydrobiologia*, 295:231~239
- Wu Z B, Xia Y C, Deng J Q, 1993. Studies on wastewater treatment by means of integrated biological pond system: Design and function of macrophytes. *Water Sci Techn*, 27(1):97~105
- Wu Z B, Xia Y C, Zhang Y Y, Deng J Q, Chen X T, Zhan F C, Wang D M, 1993. Studies on the purification and reclamation of wastewater from a medium-sized city by an integrated biological pond system. *Water Sci Technol*, 28(7):209~216
- Wu Z B, Xia Y C, 1994. Purification and reclamation of wastewater by an integrated biological pond system. *J Environ Sci*, 6(1):13~20