

水生植物水体修复机理及其影响因素

吴建强¹, 黄沈发¹, 丁 玲²

(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 上海勘测设计研究院, 上海 200434)

摘要 阐述了水生植物的定义、利用水生植物进行水体修复的研究现状、水生植物在水体修复过程中的净化机理及其影响因素, 提出了水生植物水体修复技术今后有待进一步研究的问题。水生植物水体修复效果受到多种影响因素的制约, 主要包括植物选型和群落配置、温度、透明度、污染物浓度等。必须根据实际情况, 选择合适的水生植物, 采取必要措施, 提高水生植物水体修复效果。

关键词 水生植物; 水体修复; 修复机理

中图分类号 :X173 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2007)04-0018-05

Mechanisms of water restoration by aquatic plants and its influencing factors

WU Jian-qiang¹, HUANG Shen-fa¹, DING Ling²

(1. Shanghai Academy of Environmental Science, Shanghai 200233, China; 2. Shanghai Investigation, Design & Research Institute, Shanghai 200434, China)

Abstract The definition of aquatic plants, mechanisms and present research of water restoration by aquatic plants, and its influencing factors were presented in detail. Issues to be further studied about the technology were put forward. The effect of water restoration by aquatic plants is restricted by many factors, mainly including plant selection, community composition, temperature, transparency, pollutant concentration, etc. Appropriate aquatic plants must be selected according to actual situation to improve the effect of water restoration.

Key words aquatic plants; water restoration; restoration mechanism

1 水生植物的定义

水生植物包括常年生活在水中以及长期生活在非常潮湿或者 100% 饱和和土壤中的植物^[1]。狭义范围内的水生植物是指维管束植物, 仅包括蕨类植物、裸子植物以及被子植物, 而广义的水生植物则是指所有的植物, 包括维管束植物、不具有维管束构造的低等植物, 如藻类植物与苔藓植物等。

的水生植物则通常是指大型水生植物, 它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(aquatic vascular plant)和高等藻类。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 种类型^[2]: 挺水(emergent)、漂浮(free-drifting)、浮叶(floating-leaved)和沉水(submergent), 见表 1。

目前国内外研究较多的作为污染治理和修复用

表 1 大型水生植物分类

类型	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	植物体漂浮于水面, 具有特殊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

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(04DZ12032)

作者简介: 吴建强(1977—), 男, 江苏宜兴人, 工程师, 硕士, 主要从事生态修复研究。E-mail: wujq@saes.sh.cn

2 水生植物水体修复研究现状

20 世纪 70 年代中期以来,国内外在利用水生植物净化和修复污染水体方面都做了大量的研究工作^[3-9],研究了一些高产、速生植物对污染物的吸收、积累、分解等作用,在消除污染、改善水质、恢复水体生态功能、提高经济效益等方面取得了众多成果。

到目前为止,国内外众多实验研究找出了很多对水体净化和修复有显著作用的水生植物,并把它们运用于多种生产实践之中,如河岸护坡^[10]、缓冲带^[11]、人工浮床^[12]、人工湿地^[13]、稳定塘^[14]等(表 2),取得了很好的社会、经济、环境和生态效益。按照研究的频度对这些水生植物的排序如表^[22]。

3 水生植物水体修复机理

3.1 吸收利用和富集作用

水生植物能直接吸收利用污水中的营养物质,

供其生长发育。废水中的有机氮被微生物分解与转化,而无机氮(氨氮)作为植物生长过程中不可缺少的物质被植物直接摄取,合成蛋白质与有机氮,再通过植物的收割而从废水和湿地系统中除去^[23];如同无机氮一样,无机磷也是植物必需的营养元素,废水中的无机磷在植物吸收及同化作用下可转化成植物的 ATP、DNA、RNA 等有机成分,然后通过植物的收割而移去^[24]。生根植物直接从砂土中去除氮磷等营养物质,而浮水植物则在水中去除营养物质^[25]。许多根系不发达的沉水植物,例如金鱼藻属(*Ceratophyllum*)也能直接从水中吸收营养物质^[26]。在海涂,芦苇(*Phragmites australis*)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^[27]。

环境中的重金属和一些有机物并非是植物生长所需要的,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来耐

表 2 水生植物污染净化系统^[15-21]

类型	使用方式或地点	处理范围	去污机理	种类	研究和应用情况
漂浮植物	强化氧化塘等类似塘系统、天然水体	城镇污水的二级或三级处理,某些工业废水、暴雨径流、受污染水体修复	植物吸收、微生物代谢	凤眼莲、浮萍、大漂、水花生、满江红	设计简单,但工艺优化研究较少,应用受制约
挺水植物	人工或天然湿地、水体	城镇污水的二级或三级处理,某些工业废水、暴雨径流、受污染水体修复	微生物代谢、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,工艺设计渐趋成熟
沉水植物	天然水体	沉水植被恢复,受污染水体修复	短期储存氮磷、控制富营养化	水体原有种类为主	操作和实施难度大,研究和应用较少

表 3 国内外对污染水体有净化和修复作用的水生植物及其研究频度统计

中文名	学名	生活型	研究频度	中文名	学名	生活型	研究频度
凤眼莲	<i>Eichhornia rassipes</i> Solms	浮水	1	睡莲	<i>Nymphaea albalinna</i> Linn. spp.	浮叶	9
芦苇	<i>Phragmites communis</i> Trin	挺水	2	满江红	<i>Azalla imbricate</i> [Roxb] Nakai	浮水	10
喜旱莲子草	<i>Alternanthera philoxeroides</i>	挺水或湿生	3	美人蕉	<i>Canna generalis</i> Bailey	栽培、水生或陆生	10
香蒲	<i>Typha minima</i> Funk spp.	挺水	4	聚草	<i>Myriophyllum spiaturn</i> L.	沉水	10
菹草	<i>Potamogeton crispus</i> L.	沉水	5	水鳖	<i>Hydrocharis asiaticus</i> Miq	浮水	10
水蕹	<i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	挺水或湿生	6	莼菜	<i>Nymphoides peltata</i> [Gmel.] O. Kuntze	浮水	10
菰	<i>Zizania latifolia</i> [Griseb.] Stapf	挺水	7	槐叶萍	<i>Salvinia natans</i> [L.] All	浮水	10
浮萍	<i>Lemna minor</i> L.	浮水	7	石菖蒲	<i>Acorus tatarinowii</i> Schott	挺水	10
菱	<i>Tropha quadrispinosa</i> Roxb. spp	浮叶	7	稻	<i>Oryza sativa</i> Linn.	挺水	11
金鱼藻	<i>Ceratophyllum demersum</i> L.	沉水	7	鸭跖草	<i>Commelina communis</i>	湿生	11
伊乐藻	<i>Elodea canadensis</i>	沉水	8	慈菇	<i>Asarum sagittaria</i> Linn. spp.	挺水	11
荷花	<i>Nelumbo nucifera</i> Gaertn	浮叶	8	荆三棱	<i>Scirpus yagra</i> Ohwi	挺水	11
苦草	<i>Vallisneria spiralis</i> L.	沉水	8	马来眼子菜	<i>Potamogeton malaianus</i>	沉水	11
黑藻	<i>Hydrilla verticillata</i> Royle	沉水	8	鹿齿眼子菜	<i>Potamogeton pectinatus</i>	沉水	11
水芹	<i>Oenanthe javanica</i> L.	挺水或湿生	8	狐尾草	<i>Myriophyllum</i> Linn. sp	沉水	11
紫萍	<i>Spirodela polyrhiza</i> [Linn.] Schleid	浮水	9	水浮莲	<i>Pistia stratiates</i> Linn.	浮水	12
灯心草	<i>Juncus effusus</i> Linn.	湿生	9	水芋	<i>Calla palustris</i> Linn	挺水或湿生	12
菖蒲	<i>Acorus calamus</i> L.	挺水	9	荸荠	<i>Eleocharis dulcis</i>	挺水	12
水葱	<i>Scirpus validus vahl</i>	挺水	9	轮藻	<i>Chara vaillant ex</i> Linn.	沉水	12
多花黑麦草	<i>Lolium multiflorum</i> Lam.	湿生	9	水筛	<i>Blyxa japonica</i> (Miq.)Aschers	沉水	12
大茨藻	<i>Najas marina</i> L.	沉水	9	水龙	<i>Lussieuia repens</i> Linn.	浮水	12

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。水生植物吸收富集能力为:沉水植物>漂浮植物>挺水植物,不同部位浓缩作用也不同,一般为根>茎>叶,各器官的累积系数随污水浓度的上升而下降^[28-31]。研究认为植物对有毒有害物质的吸收以被动吸收为主,增加植物和废水的接触时间,可增强植物对其的去除率^[32-34]。Ellis等的研究表明,宽叶香蒲(*Typha latifolia*)和黑三棱(*Sparganium 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^[35]。芥菜(*Brassica juncea*)根际附着大量的细菌后,能加速Se的富集和挥发^[36]。凤眼莲具有直接吸收降解有机酚类的能力^[37-38],据报道,放养凤眼莲后水的酚去除效率提高了2~3倍^[39],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^[40]。

3.2 微生物降解作用

与其他的生物处理系统一样,在以水生植物为核心的污水净化系统中,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)主要由于微生物的代谢活动被去除,去除氮,尽管有植物的吸收,但硝化和反硝化作用仍是主要的,去除率约40%~92%^[41]。

尽管如此,水生植物的作用仍然是不可或缺的。首先,水体中微生物降解污染物质所需的氧主要来自水生植物输氧。缺氧条件下,生物不能进行正常有氧呼吸,还原态的某些元素和有机物的浓度可达到有毒的水平^[42]。有研究表明,水生植物的输氧速率远比依靠空气向液面扩散速率大,植物的输氧功能对降解污染物好氧的补充量远大于由空气扩散所得氧量^[43]。植物输氧是植物将光合作用产生的氧气通过气道输送至根区,在植物根区的还原态介质中形成氧化态的微环境^[44-45]。这种输氧作用使根毛周围形成一个好氧区域,其中好氧生物膜对氧的利用使离根毛较远的区域呈现缺氧状态,更远的区域则完全厌氧。这种连续呈现好氧、缺氧、厌氧的状态,相当于许多串联或并联的A/A/O处理单元,这样植物在为水体输氧的同时,还可以通过硝化、反硝化作用及微生物对磷的过量积累作用使氮、磷从废水中去除。因此,水生植物在人工湿地去除铵、亚硝酸盐、硝酸盐、磷酸盐、SS和BOD等方面间接或直接地起着重要作用^[25]。

其次,水生植物还为微生物提供栖息地。水生植物的根系常形成一个网络状的结构,并在植物根系附近形成好氧、缺氧和厌氧的不同环境,为各种不同微生物的吸附和代谢提供了良好的生存环境。很

多大型挺水植物在水中部分能附生大量的藻类,这也为微生物提供了更大的接触表面积^[25]。研究表明,有植物的水体中,细菌数量显著高于无植物系统,植物的根系分泌物还可以促进某些嗜磷、氮细菌的生长,促进氮、磷的释放和转化,从而间接提高净化率^[24]。

3.3 过滤沉淀颗粒作用

水生植物发达的根系与水体接触面积大,可以形成密集过滤层,当水流通过时,可以过滤掉水体中的污染物质,在其表面进行离子交换、整合、吸附、沉淀等,不溶性胶体被根系黏附和吸附,凝集的菌胶团把悬浮性的有机物和新陈代谢的产物沉降下来,使周围水体变清^[46-47]。挺水植物的茎和叶以及浮水植物的根还可以用来减缓水流速度和消除湍流作用,以达到过滤和沉淀泥沙颗粒、有机微粒的作用^[25]。如在种有芦苇的水池中,其水中悬浮物减少30%,氯化物减少90%,有机氮减少60%,磷酸盐减少20%,氨氮减少66%^[32]。

通过植被的拦截和过滤作用,还能大量滞留许多有害的金属,吸收地表污染物。在河道两侧和湖泊建设缓冲带和护坡,依靠种植的植物能吸收、沉淀、过滤和降解溶于雨水中的酚、氰、铬、锌等有机化合物,使得含有有毒有害物质的雨水得到过滤和净化,减少了有毒有害物质对水体的污染。

4 水生植物水体修复的影响因素

大量实践证明,影响水生植物净化效果的因素主要有水生植物的类型与群落构成、气候条件、透明度、污染物浓度等。

4.1 水生植物选型及群落配置

水生植物的选型应以土著植物为主,可适当引入观赏类和具有经济价值的外来物种。水体修复时选择水生植物考虑的因素很多,但主要有以下几个方面:耐污能力强、去污效果好、适合当地环境、根系发达。现在国际上公认的湿地淡水水生植物优势品种有:宽叶香蒲、芦苇、苦草、凤眼莲、软水草和狐尾藻^[48-50]。不同物种对不同污染因子的净化能力不一样,同一物种在不同的环境下对污染因子的净化能力也不一样,所以考虑适当的群落配置能提高水生植物系统的净化效果,更能体现生物多样性,易于建立完整稳定的生态系统。如在河道中由岸边向水体中心依次栽种湿生植物、挺水植物、浮水植物和沉水植物,也可以采用人工浮岛、沉床技术等。李文朝^[51]选用耐寒植物伊乐藻、喜温植物凤眼莲和菱组建成的常绿型人工水生植被,不仅使实验区内常年保持较好的水质,而且对外来污染冲击有很强的缓

冲能力,它可用于水源保护、局部性水质控制、污水净化生态工程、小型富营养水体的生态恢复等。

4.2 温度

水生植物对污染物的吸收受温度的制约,当温度处于植物适应的范围内时,随着温度的升高植物的生长速度加快,其对水体中氮、磷等营养物质的去除效果也随之增强。夏、秋季节,许多喜温水生植物处于生长旺盛期,同时也表现出较高的净化效率,这是由于水生植物的净化能力与其自身的生长状况及新陈代谢有关。如高吉喜^[52]所进行的试验说明,同一植物在不同月份对富营养化水体中氮、磷的净化率不同,其原因可能是在不同时期植物的生长发育阶段不同,其生长速率及代谢功能也不同,由此导致植物对氮、磷等营养元素的吸收量不同。深秋和冬季,许多喜温水生植物已处于衰老和死亡阶段,自然会失去其净化能力。但对于耐寒植物来说,情况却相反,在寒冷季节对水体中污染物有较高的净化率,如水芹、聚草等^[48]。因此,可以利用这两类习性不同的水生植物对废水进行净化处理,以解决冬季污水净化的问题。

4.3 透明度

水体透明度表示光线在水体中的透射深度,其大小随水体和其中悬浮物、浮游藻类对入射光的吸收和散射的差异而变化,所以悬浮物的成分和含量极大地影响着水体的透明度变化^[53]。水体透明度会影响其中水生植物的生长状况,大量的研究结果表明,在水体的一定深度存在光补偿点和补偿深度,只有在光补偿(点)深度以上,沉水植物才能进行正常的光合作用和呼吸作用,植物才能生长^[54]。污染水体中含有的大量悬浮物质和有机物质增加了光在水体中的吸收和散射,使水下光强进一步削弱,这样就导致了污染水体的底层水体光照十分微弱,透明度很低。在这样的水体环境条件下,沉水植物的生存将受到严峻挑战,群落光合作用小于呼吸作用,生存困难,并最终导致植物群落的消亡。国内众多行洪河道在行洪期水位急剧上升,泥沙等悬浮物降低了水体的透明度,使得原本生长在水体中的挺水、沉水植物都位于光补偿点以下,导致其死亡。

由于水生植物生态修复中补偿深度条件的限制,目前通常采用的方法是通过降低水位的办法来改变水下光照条件,随着植物的生长,逐渐恢复到原来的水位。通过降低水位的办法克服补偿深度对植被恢复的限制在实践中也取得了一定的效果,但是受到技术条件和实施难度的限制,在应用中受到很大的局限。因此,如何在低透明度水体和行洪河道中移栽水生植物进行水体修复成为研究难点。

4.4 污染物浓度

水生植物的生存存在一个阈值问题,水体中污染物浓度一旦超过其生存阈值则会导致水生植物枯萎甚至死亡。目前国内外对水生植物生存阈值研究较少,少数研究的重点也集中于沉水植物以及pH值和重金属方面^[55-56],这也影响了水生植物在污染处置中的应用。夏汉平^[57]用水葫芦、百喜草、水花生、香根草4种植物对垃圾污水进行净化,水葫芦在高浓度和低浓度两种污水中均被毒害致死;百喜草在高浓度的渗滤液中不能存活,在低浓度污水中受到严重伤害;水花生在高浓度污水中伤害较重,低浓度中形成庞大生物体;香根草在2种污水中受到的伤害在4种植物中最轻。

5 结论与展望

水生植物作为污染水体修复过程中一个重要的参与者,越来越受到更多的国家和地区的重视,并广泛运用于研究和实践领域。水生植物不仅自身能吸收一部分污染物质,还向水体中提供大量的氧气,为微生物的存在和分解污染物质起到了关键的作用。以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的应用。今后对水生植物水体修复的研究应该着重加强以下几方面:①不同生境条件下水生植物的生理生态研究;②不同条件下水生植物的最优选型和最优群落配置的研究;③低透明度污染水体和行洪河道水生植物生存的研究;④不同水生植物对于不同污染因子的生存阈值问题。

参考文献:

- [1]倪乐意.大型水生植物[M].北京:科学出版社,1999:224-241.
- [2]颜素珠.中国水生高等植物图说[M].北京:科学出版社,1983:5-9.
- [3]WILLIAN J J. The role of water plant in water treatment[J]. Agricultural Eng, 1986, 5(6):9-10.
- [4]蒋志学,邓士谨.环境生物学[M].北京:中国环境科学出版社,1989:179-181.
- [5]刘建武,林逢凯,王郁.水生植物根系对氮的吸附过程研究[J].环境科学与技术,2003,26(2):32-34.
- [6]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.
- [7]程静.高等水生植物在水体污染中的作用及其发展前景[J].福建环境,1992,2(5):14-16.

- [8] 吴玉树. 水生植物对生活污水的净化效率[J]. 生态学报, 1988 (4) :347-353.
- [9] 宋祥甫, 邹国燕. 浮床水稻对富营养化水体中氮、磷的去除效果及规律研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(5) :489-493.
- [10] 鄢俊. 植草护坡技术的研究和应用[J]. 水运工程, 2000, (5) :29-31.
- [11] SHERIDAN J M, LOWRANCE R, BOSCH D D. Management effects on runoff and sediment transport in riparian forest buffers[J]. *Trans ASAE*, 1999, 42(1) :55-64.
- [12] 屠清瑛, 章永泰, 杨贤智. 北京什刹海生态修复试验工程[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1) :21-25.
- [13] ROSGERS K H, BREEN P F, CHICK A J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: evidence for the role of aquatic plants[J]. *Res JWPCF*, 1991, 63 :934-941.
- [14] LAANBROEK H J, GERARDS. Competition for limiting amounts of oxygen between *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacteria winogradskyi* grown in mixed continuous cultures[J]. *Arch Microbiology*, 1993, 159 :453-459.
- [15] 曹向东, 王宝贞, 蓝云兰, 等. 强化塘-人工湿地复合生态系统中氮磷的去除规律[J]. 环境科学研究, 2000, 13(2) :5-19.
- [16] 黄韵珠, 蒲铜良, 王勋陵, 等. 植物学净化塘处理油漆废水的实验研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1995, 31(2) :127-132.
- [17] ALLINSON G, STAGNITTI F, COLVILLE S. Growth of floating aquatic macrophytes in alkaline industrial wastewaters[J]. *Environ Eng* 2000, 12 :1103-1107.
- [18] 李卫平, 王军. 应用水葫芦去除电镀废水中重金属的研究[J]. 生态学杂志, 1995, 14(4) :30-35.
- [19] 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[M]. 北京: 科学出版社, 1995 :302-310.
- [20] JOHN T, BETH J. The design of living technologies for waste treatment[J]. *Ecological Engineering*, 1996, 6(1) :109-136.
- [21] BUSK T A D, WILLIAMS L d, RYTHYER J H. Removal of nitrogen and phosphorus from wastewater in a water hyacinth-based treatment system[J]. *Enviro Qual*, 1985, 12(2) :257-262.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 张鸿, 陈光荣. 两种人工湿地中氮、磷净化率与细菌分布关系的初步研究[J]. 华中师范大学学报, 1999, 33(4) :575-578.
- [25] GREENWAY M. Suitability of macrophytes for nutrient removal from surface flow constructed wetlands receiving secondary treated sewage effluent in Queensland, Australia[J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(2) :121-128.
- [26] HOSOKAWA Y, HORIE T. Flow and particulate nutrient removal by wetland with emergent macrophyte[J]. *Sci Total Environ*, 1992, suppl : 1271-1282.
- [27] 吴献花. 人工湿地处理污水的机理[J]. 玉溪师范学院学报, 2002, 18(1) :103-105.
- [28] 廖绅裕, 陈桂珠. 模拟秋茄湿地系统中镍、铜的发布积累与迁移[J]. 环境科学学报, 1999, 19(5) :545-549.
- [29] YE Z H, WHITING S N. Trace element removal from coal ash leachate by a 10-year-old constructed wetland[J]. *J Environ Qual*, 2001, 30(9-10) :1710-1719.
- [30] YE Z H, WHITING S N. Removal and distribution of iron, manganese, cobalt, and nickel within a pennsylvania constructed wetland treating coal combustion by-product leachate[J]. *J Environ Qual*, 2001, 30(7-8) :1464-1473.
- [31] 戴全裕. 水生高等植物对太湖重金属的监测及其评价[J]. 环境科学学报, 1983, 3(3) :213-223.
- [32] 戴全裕. 水生高等植物对废水 Ag 的净化与富集特性研究[J]. 生态学报, 1990, 10(4) :343-348.
- [33] 刘金栋. 芦苇对镉等几种毒物净化能力的研究[J]. 环境污染与防治, 1984(6) :19-20.
- [34] 吴玉树. 水生维管束植物对水体 Pb 污染的反应抗性和净化作用[J]. 生态学报, 1983, 3(3) :185-195.
- [35] ELLIS J B, REVITT D M, SHUTES R B E, et al. The performance of vegetated biofilters for highway runoff control[J]. *Sci Total Environ*, 1994, 146-147 :543-550.
- [36] SOUZA M P, CHU D, ZHAO M, et al. Rhizosphere bacteria enhance selenium accumulation and volatilization by Indian mustard[J]. *Plant Physiol*, 1999, 119 :565-573.
- [37] 赵大君, 郑师章. 无菌凤眼莲的降酚研究[J]. 生态学杂志, 1994, 13(3) :25-29.
- [38] 谭常. 凤眼莲净化含酚废水的研究[J]. 环境科学学报, 1986, 17(1) :71-76.
- [39] JOSEPH B, HUGHES J. Transformation of TNT by aquatic plants and plant tissue cultures[J]. *Environ Sci Tech*, 1997, 31(1) :266-271.
- [40] REDDY K R, DEBUSK T A. State-of-the art utilization of aquatic plants in water pollution control[J]. *Wat Sci Tech*, 1987, 19(10) :61-79.
- [41] 成水平. 人工湿地植物研究[J]. 湖泊科学, 2002, 14(2) :179-184.
- [42] FENNESSY M S, CRONK J K, MITSCH W J. Macrophyte productivity and community development in created freshwater wetlands under experimental hydrological conditions[J]. *Ecol Eng*, 1994, 3(4) :469-484.
- [43] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1994, 16(3) :83-86.
- [44] 吴晓磊. 污染物质在人工湿地中的流向[J]. 中国给水排水, 1994, 10(1) :40-43.
- [45] SPARLING D W. Metal concentrations in aquatic macrophytes as influenced by soil and acidification[J]. *Water Air Soil Pollut*, 1998, 18(12) :203-221.
- [46] 齐玉梅, 高伟生. 凤眼莲净化水质及其后处理工艺探讨[J]. 环境科学进展, 1999, 7(2) :136-139.
- [47] 陈桂珠, 马曼杰. 香蒲植物净化塘净化生态系统调查研究[J]. 生态学杂志, 1999, 9(4) :11-15.

(下转第 36 页)

$$W = \begin{bmatrix} 0.7037 & 0.7246 & 0 & 0.5135 \\ 0.0072 & 0.0018 & 0.3394 & 0.1083 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2436 \\ 0 & 0.0358 & 0 & 0 \\ 0.0860 & 0.0158 & 0.3670 & 0.1346 \\ 0.2031 & 0.2220 & 0.2936 & 0 \end{bmatrix}$$

2.4 模糊模式识别评价

根据模糊模式识别模型,即式(14),取 $p = \alpha$ (欧氏距离)^[1],可对塔里木河的实际水质状况进行模糊模式识别评价。运用2种不同的权重计算方法,均可计算出不同断面(样本)对于不同污染物种类(指标)的相对隶属矩阵 U_1 、 U_2 。

$$U_1 = \begin{bmatrix} 0.232 & 0.236 & 0.489 & 0.075 \\ 0.314 & 0.309 & 0.307 & 0.183 \\ 0.275 & 0.278 & 0.157 & 0.694 \\ 0.179 & 0.177 & 0.047 & 0.048 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_2 = \begin{bmatrix} 0.1244 & 0.1435 & 0.1971 & 0.0637 \\ 0.5057 & 0.5053 & 0.3621 & 0.2590 \\ 0.3114 & 0.2913 & 0.3565 & 0.6374 \\ 0.0585 & 0.0599 & 0.0843 & 0.0429 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(15)计算得到样本集的级别特征值向量 H_1 、 H_2 ,从而对河流水质进行级别归类。

$$H_1 = (2.401, 2.396, 1.762, 2.715)$$

$$H_2 = (2.304, 2.2676, 2.328, 2.6655)$$

将采用不同方法计算权重所得的水质模糊模式识别评价进行比较,水质类别见表2。

表2 模糊模式识别评价结果

权重计算方法	断面1	断面2	断面3	断面4
因子污染分担率法	Ⅲ类水	Ⅲ类水	Ⅱ类水	Ⅲ类水
相关系数法	Ⅲ类水	Ⅲ类水	Ⅲ类水	Ⅲ类水

采用2种计算权重的方法进行塔里木河水质综合评价,其评价结果基本一致,仅个别断面略有差异。运用模糊模式识别模型对水质进行综合评价的优越性主要体现在以下几个方面:

a. 指出了仅用单一的绝对数据对水质类别进行划分的缺点,同时也弥补了运用最大隶属度对水质类别进行划分中存在的不足。

b. 不仅考虑了不同评价指标、不同监测断面对河流水质污染的相对隶属程度,同时也考虑了它们之间对污染程度的相互作用和影响。

c. 能够从宏观即河流的整体状况去把握水质类别及污染程度,从而能够对整个流域的水质进行综合评价。

3 结论

由于传统的水质评价方法不能够准确、客观处理模糊边界问题,从而对评价结果产生偏差和影响。有鉴于此,本研究将相对隶属度应用到河流水质模糊评价中。通过对评价河流监测断面不同指标的相对隶属度的判断,不仅能得出评价断面的水质类别,而且能反映出河流整体污染程度,从而得出水质类别。这样能够更加科学、实际、有效地利用监测数据对地表水的污染程度进行综合评价,同时也弥补了现行水质评价中用单一指标作为分界线的简单评价法中的缺陷。

参考文献:

- [1] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 159-163.
- [2] 吴超, 廖国礼. 矿区总体环境质量模糊综合评价实践[J]. 矿业研究与开发, 2004(4): 60-63.
- [3] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979: 118-122.
- [4] 陈守煜, 熊德琪. 湖泊富营养化评价模糊集理论与模式[J]. 湖泊科学, 1993(2): 145-152.
- [5] 陈守煜, 李亚伟. 基于模糊神经网络识别的水质评价模型[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 88-91.

(收稿日期 2006-02-25 编辑: 傅伟群)

(上接第22页)

- [48] GOPAL B, GOEL U. Competition and allelopathy in aquatic plant communities[J]. Bot Rev, 1993, 59: 155-210.
- [49] GRACE J B, WETZEL R G. Habitat partitioning and competitive displacement in cattails (Typha): experimental field studies[J]. Am Nat, 1981, 118: 463-474.
- [50] GRACE J B, WETZEL R G. Long-term dynamics of Typha populations[J]. Aquat Bot, 1998, 61: 137-146.
- [51] 李文朝. 富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(1): 53-57.
- [52] 高吉喜. 水生植物对面源污水净化效率研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(3): 247-251.
- [53] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体透明度的分析、变化及相关性分析[J]. 海洋湖沼通报, 2003(2): 30-36.
- [54] 白峰青, 郑丙辉, 田自强. 水生植物在水污染控制中的生态效应[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(4): 99-100.
- [55] 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 92-99.
- [56] 林昱, 林荣澄. 厦门西港引发有害硅藻水华磷的阈值研究[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(4): 391-396.
- [57] 夏汉平. 垃圾污水的植物毒性与植物净化效果之研究[J]. 植物生态学报, 1999, 23(4): 289-301.

(收稿日期 2005-11-30 编辑: 傅伟群)