

人工湖水体富营养化的活性炭处理 技术及生态修复建议

张鹏飞¹, 岳焯², 侯嫔², 严哲², 林雷鸣²

(1. 包头市园林绿化管理局, 内蒙古 包头 104030; 2. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 通过对包头市两个典型人工湖的水体富营养化现状分析, 研究木质和煤基活性炭对人工湖中叶绿素 a、COD、浊度、蓝藻、总氮和总磷的去除效果。结果表明: 木质活性炭对劳动园人工湖中叶绿素 a、COD 和浊度的去除率更高 (>96%); 煤基活性炭对总氮和蓝藻的去除率更高 (>88%), 出水达到地表水环境质量标准 (GB3838 - 2002) 二级标准。同时, 提出了长期治理人工湖水体富营养化的生态修复方案, 以为长期有效治理人工湖水体富营养化提供帮助。

关键词: 包头市人工湖; 水体富营养化; 活性炭; 治理技术; 生态修复

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0092-07

Activated carbon processing technique of artificial Lake eutrophication and suggestions of its ecological restoration

ZHANG Pengfei¹, YUE Ye², HOU Pin², YAN Zhe², LIN Leiming²

(1. Baotou Landscaping Administration Bureau, Baotou 104030, China; 2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the analysis of eutrophication status of two typical artificial lakes in Baotou, the removal efficiency of chlorophyll a, COD, turbidity, cyanobacteria, total nitrogen and total phosphorus using the wood-based and coal-based activated carbon were studied. The results showed that, wood-based activated carbon had higher removal efficiency of chlorophyll a, COD and turbidity (>96%) in Labor Park artificial lake; the coal-based activated carbon exhibited better removal rate for total nitrogen and cyanobacteria (>88%), and the effluent water quality achieved the level -2 of China Surface Water Quality Standard (GB3838 - 2002). In addition, the ecological restoration schemes for long-term artificial lake eutrophication were proposed, in order to provide help for long-term and effective management of artificial lake eutrophication.

Key words: artificial lake in Baotou; water eutrophication; activated carbon; treatment technology; ecological restoration

水体富营养化是指湖泊、水库和海湾等封闭、半封闭性水体及某些滞留河流(水流速度小于 1m/min)水体由于氮和磷等营养元素的富集, 导致某些特征藻类(如蓝绿藻)和其它水生植物异常繁殖、异养微生物代谢频繁、水体透明度下降、溶解氧含量降低、水生生物大量死亡、水质恶化、水味发腥变臭、最终破坏湖泊生态系统^[1]。由于水体富营养化对河

流湖泊影响较大, 而且地表水环境质量标准 (GB3838 - 2002) II 类标准 (TP: 0.1mg/L, TN: 0.5 mg/L) 对水质要求较为严格, 因此, 国内外针对水体富营养化的治理技术已进行了大量研究。目前, 常用的水体富营养化治理技术主要有物理方法、化学方法和生态-生物法。化学法^[2-3]主要是通过添加除藻剂、混凝沉淀等方法控制水中氮磷等污染

收稿日期: 2017-01-23; 修回日期: 2017-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508555); 北京市自然科学基金项目(8152025)

作者简介: 张鹏飞(1971-), 男, 内蒙古包头人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事园林绿化工程施工及管理。

通讯作者: 侯嫔(1985-), 女, 内蒙古包头人, 博士研究生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为环境材料的制备及其在水处理中的应用。

物的含量,具有操作简单、用量少,见效快等优点,但是还存在成本高,影响生态环境,存在二次污染等问题。物理法主要是通过稀释冲刷^[2,4-6]、曝气充氧^[7]、物理吸附^[3,6-20]、控制底泥^[3,13-17]等方法控制水中氮磷等污染物的含量,处理效果好,但是也有需水量大、成本高,破坏生态,存在二次污染等问题。其中,活性炭^[8-12]是现在常用的对封闭水体富营养化的治理技术,无需消耗外界能量,操作简单,运行维护方便,张海昆^[8]的研究表明在炭层厚度为 2 m、滤速为 8m/h 时对 COD_{Mn} 的去除率可达 43.25%,对浊度的去除率可达 81%,滤速为 12 m/h 时对藻类去除率可达 85%,对浊度的平均去除率为 78.42%;东华大学环境科学与工程学院采用臭氧接触柱和活性炭滤柱进行了相关的研究,结果表明活性炭对高锰酸盐指数去除率高达 59%,对 TOC 去除率可达 61%^[12]。生态-生物法主要是通过植物修复^[21-23]、微生物修复^[24-30]、动物修复以及植物动物联合修复等方式控制水中氮磷等污染物的含量,成本低,环保、经济、无二次污染,因此,是一种长期有

效治理水体富营养化的方法,主要受气候、季节、地理环境等因素影响。

因此,本文选取包头市劳动园和植物园两个典型人工湖为研究对象,通过分析其水体富营养化污染现状,考察了活性炭吸附法对人工湖水体中 COD、总氮、总磷、蓝藻和叶绿素 a、浊度等指标的去除效果,并提出了长期解决水体富营养化的有效途径。

1 材料与方法

1.1 材料

实验中采用的活性炭为煤基活性炭和木质活性炭,分别购自大同市丰华活性炭有限公司和广州市韩研活性炭有限公司。

实验中水样分别取自包头市阿尔丁植物园和劳动园人工湖。其中,劳动园人工湖湖面面积为 5.8 hm²,植物园人工湖水体面积为 4.34 hm²,目前均存在水体富营养化问题,且劳动园人工湖水体富营养化现象更为严重,两个人工湖水水质现状分析见表 1。

表 1 典型人工湖水水质现状分析表

湖名	叶绿 a/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	蓝藻/ 10 ⁶ mL	总氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	浊度/ NTU	总磷/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
劳动园人工湖	68.02 ± 0	162 ± 0	9.02 ± 0	78.26 ± 0	38.62 ± 0.01	0.222
阿尔丁植物园	11.31 ± 0	124 ± 0	(1.98 ~ 8) ± 0	21.07 ± 0	3.34 ± 0.01	0.012
富营养化标准 * (>)	26	-	1	-	-	0.100

注: * 依据水利部《地表水资源质量评价技术规程》(SL395-2007) 湖库营养状态评价标准。

1.2 方法

1.2.1 静态吸附方法 实验中所用吸附方法为静态吸附方法,首先分别称取 0.01、0.02、0.05、0.1 和 0.2 g 木质和煤基活性炭,放入 50 ml 的装有人工湖水样的锥形瓶中;然后将锥形瓶封好后在 20 °C 下恒温振荡 24 h,混合液用 0.45 μm 混纤过滤膜过滤,测定过滤后水样中不同污染物的浓度。每组静态实验均设置平行实验,误差可控制在 3% ~ 5%。

1.2.2 活性炭表征方法 实验中采用 Autosorb-iQ 仪器(美国 Quantachrome 公司)测定活性炭的 BET 比表面积和孔容孔径,采用傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet iS10 美国)对活性炭表面官能团进行分析,采用元素分析仪(vario MACRO CHNS)对活性炭进行元素分析,采用扫描电子显微镜(SEM)对活性炭形貌进行成像观察分析。

1.2.3 化学分析方法 实验中蓝藻采用血球计数板计数,叶绿素 a 采用乙醇萃取紫外分光光度法,浊

度采用浊度仪测量,氨氮采用纳氏试剂比色法(HJ535-2009)、总磷采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法(GB11893-89)、COD 采用快速消解分光光度法(HJ/T 399-2007)。

2 活性炭对水中污染物的去除效果研究

2.1 活性炭对叶绿素 a 的去除效果

图 1 为煤基活性炭和木质活性炭对包头市劳动园(图 1(a))和阿尔丁植物园人工湖(图 1(b))中叶绿素 a 的去除效果随投加量的变化曲线。由图 1(a)可知,随着木质活性炭投加量从 0 增加到 0.05 g,劳动园人工湖中的叶绿素 a 浓度从 68.02 μg/L 降到 0,去除率可以达到 100%,明显高于煤基活性炭对叶绿素 a 的去除率(91.69%)。

当活性炭投量继续增加时(0.05 ~ 0.2 g),叶绿素 a 的去除率基本保持稳定。由图 1(b)可知,随着

木质活性炭投加量从 0 增加到 0.05 g, 阿尔丁植物园叶绿素 a 的浓度从 11.31 $\mu\text{g}/\text{L}$ 降到 0, 去除率也可以达到 100%, 高于煤基活性炭对于阿尔丁植物

园叶绿素 a 的去除率(50%); 同时, 当活性炭投量继续增加时(0.05 ~ 0.2 g), 叶绿素 a 的去除率也基本保持稳定。

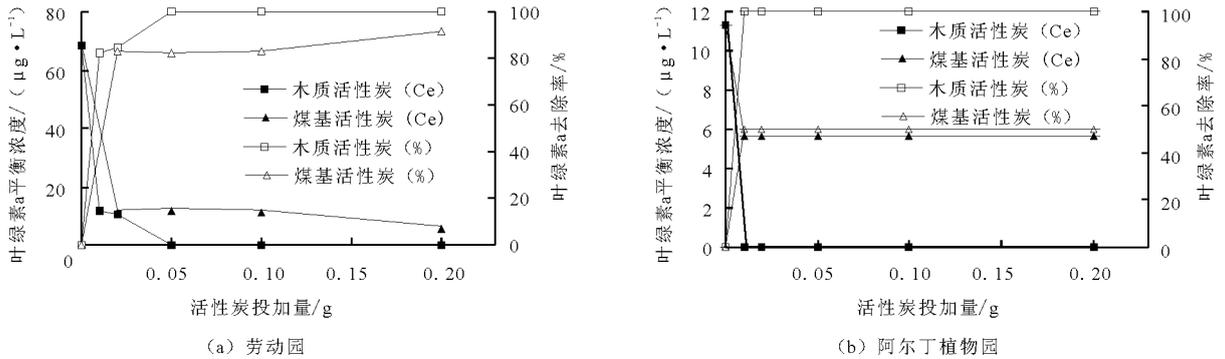


图1 两种活性炭对两个人工湖中叶绿素 a 的去除效果随投加量的变化曲线

以上结果说明, 木质活性炭对两个人工湖中叶绿素 a 的去除率都可以达到 100%, 且均明显高于煤基活性炭。这主要是由于木质活性炭具有较高的比表面积(1 696.399 m^2/g)和孔容量(1.635 cc/g) (见表 2), 为叶绿素 a 在活性炭孔隙内的扩散和吸附提供了更多的活性位。同时, 当木质活性炭投加量为 0.05 g 时, 其对劳动园人工湖中叶绿素 a 的吸附量(68.02 $\mu\text{g}/\text{g}$)明显高于对植物园人工湖(11.31 $\mu\text{g}/\text{g}$), 说明叶绿素 a 的初始浓度越高, 越有利于其在活性炭上的吸附。

2.2 活性炭对 COD 的去除效果

图 2 为煤基活性炭和木质活性炭对包头市劳动园(图 2(a))和阿尔丁植物园人工湖(图 2(b))中 COD 的去除效果随投加量的变化曲线。由图 2(a)可知, 随着活性炭投加量的增加, 劳动园人工湖中

COD 的浓度均逐渐降低, 当木质活性炭投加量从 0 增加到 0.2 g 时, 劳动园人工湖中 COD 的浓度从 78.26 mg/L 降到 21.325 mg/L , 去除率可以达到 72.75%, 高于煤基活性炭对 COD 的去除率(58.48%); 由图 2(b)可知, 阿尔丁植物园人工湖中 COD 的浓度也随着煤基活性炭投加量的增加而降低, 当活性炭投加量为 0.2 g 时, 其对 COD 的去除率可达 53.75%, 高于木质活性炭对 COD 的去除率(32.15%)。因此, 木质活性炭对劳动园人工湖中 COD 的去除效果好, 而煤基活性炭对阿尔丁植物园人工湖中 COD 的去除效果好, 且出水 COD 均可达到 GB3838-2002 地表水环境质量标准 I 类标准($<15\text{mg}/\text{L}$)。以上结果说明, 木质活性炭更有利于高浓度污染物的吸附去除, 而煤基活性炭更有利于低浓度污染物的吸附去除。

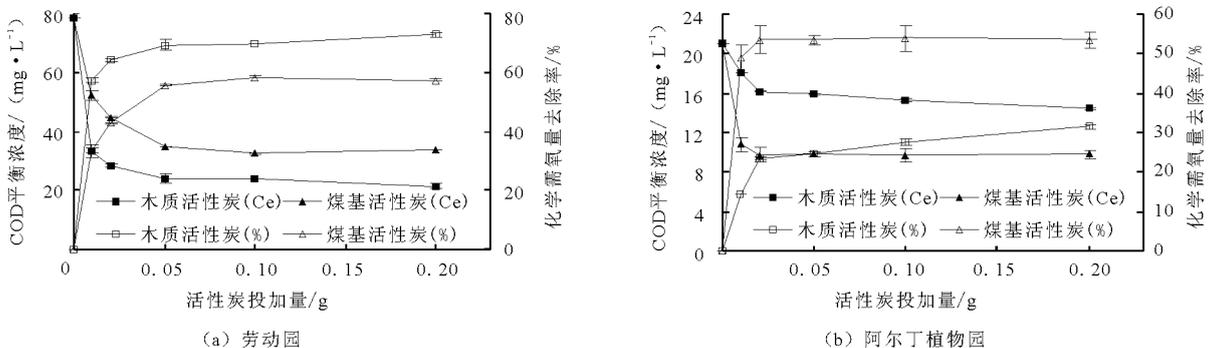


图2 两种活性炭对两个人工湖中 COD 的去除效果随投加量的变化曲线

2.3 活性炭对浊度的去除效果

图 3 为木质活性炭对包头市两个人工湖中浊度去除效果随投加量的变化曲线, 图 4 为木质活性炭

对包头市两个人工湖处理前后水样对比图。由图 3 可知, 木质活性炭对劳动园人工湖中浊度的去除效果明显优于植物园人工湖, 且随着活性炭投加量的

增加,浊度去除效果也逐渐增加,当木质活性炭投加量增加到 0.2 g 时,浊度去除率最高(95.66%),且高于对阿尔丁植物园浊度去除率(46.26%),处理后劳动园人工湖中出水浊度为 1.675 NTU,明显比处理前清澈(图 4)。这一结果与木质活性炭对叶绿素 a 和 COD 的去除效果是一致的,说明木质活性炭对富营养化程度比较严重的劳动园人工湖水水质净化效果更好,这一方面是由于木质活性炭具有较高的比表面积和孔容量(见表 2),从而提高其对污染物的物理吸附活性点位;另一方面是由于劳动园人工湖中污染物的初始浓度较高,从而增加了其在活性炭表面的扩散和吸附作用力。同时,植物园人工湖中原水浊度较低,因此其去除率也较低。

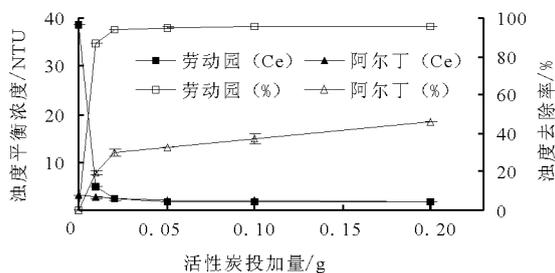


图 3 木质活性炭对两个人工湖中浊度的去除效果随投加量的变化曲线

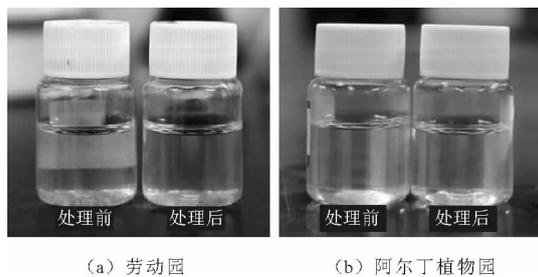


图 4 木质活性炭对两个人工湖水样处理前后对比图

2.4 活性炭对蓝藻的去除效果

图 5 为煤基活性炭对包头市劳动园与阿尔丁植物园人工湖中蓝藻去除效果随投加量的变化曲线。

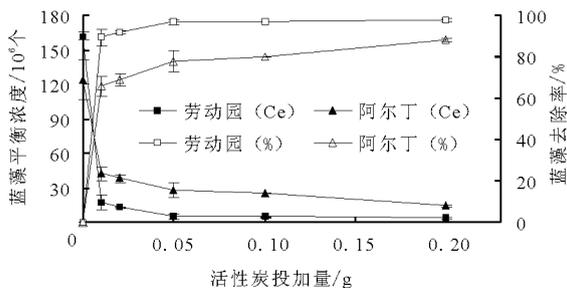


图 5 煤基活性炭对两个人工湖中蓝藻的去除效果随投加量的变化曲线

由图 5 可以看出,煤基活性炭对劳动园人工湖中蓝藻的去除效果更好,当活性炭投量从 0 增加到 0.05 g 时,劳动园人工湖中蓝藻的平衡浓度从 1.62×10^8 个/mL 下降至 3.65×10^6 个/mL,下降了两个数量级,去除率达到 97.7%,优于其对阿尔丁植物园蓝藻的去除率(88.43%)。这主要是由于植物园人工湖中蓝藻初始浓度较低,因而降低了其在活性炭表面的吸附强度。同时,当活性炭投加量持续增加时(0.05 ~ 0.2 g),由于活性炭吸附饱和,去除率趋于平稳。

2.5 活性炭对总氮的去除效果

图 6 为煤基活性炭对包头市两个人工湖中总氮去除效果随投加量的变化曲线。由图 6 可知,与蓝藻去除规律一致,煤基活性炭对劳动园人工湖中总氮的去除效果明显高于植物园人工湖,当煤基活性炭投加量从 0 增加到 0.2 g 时,劳动园人工湖中总氮的浓度从 9.02 mg/L 降到 1.10 mg/L,去除率达到 87.78%。而此时,植物园人工湖中的总氮浓度从 1.988 mg/L 降到 0.4105 mg/L,去除率为 79.35%,也达到了 GB3838 - 2002 地表水环境质量 II 类标准)。

综上所述,活性炭对劳动园人工湖的污染物去除效果均优于植物园人工湖。其中,木质活性炭对劳动园人工湖中叶绿素 a、COD 和浊度去除效果更好,去除率分别为 100%、72.75% 和 95.66%;而煤基活性炭对藻类和 TN 的去除效果更好,去除率分别为 87.78%、97.7%。这主要是由于劳动园人工湖中初始污染物浓度较高,叶绿素 a、COD、浊度、藻类和 TN 的初始浓度分别为 $68.02 \mu\text{g/L}$ 、 78.26 mg/L 、 38.62 NTU 、 1.62×10^8 个/mL 和 9.02 mg/L (表 1),较高的初始浓度促进了活性炭表面的扩散与吸附作用。因此,处理后劳动园人工湖中水质明显改善(图 4),符合地表水环境质量标准(GB3838 - 2002) II 类标准的要求。然而,对于植物园人工湖,由于水中污染物初始浓度较低,导致其吸附作用力较弱,但经活性炭处理后,人工湖中叶绿素 a、COD、浊度、藻类和 TN 的浓度也分别降低至 0、10 mg/L、1.795 NTU、 1.44×10^7 个/mL 和 0.4 mg/L,也符合地表水环境质量标准(GB3838 - 2002) II 类标准的要求。以上结果说明,两种活性炭对两个人工湖中的水体富营养化现象均明显改善,为短期治理封闭水体中的水体富营养化提供了理论依据。

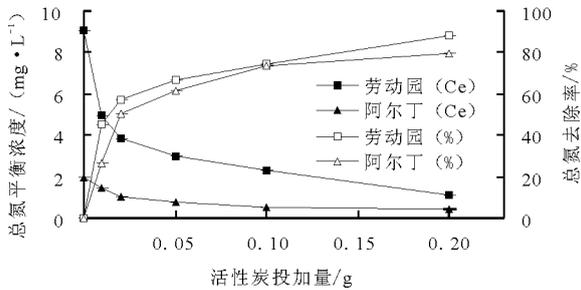


图6 煤基活性炭对两个人工湖中总氮的去除效果随投加量的变化曲线

3 活性炭的表面特性表征

3.1 活性炭孔径分布

为了进一步探究活性炭吸附去除水中污染物的机理,本文对活性炭的表面特性进行了表征。图7和表2分别列出了两种活性炭的比表面积和孔容、孔径分布。

由图7和表2可知,与煤基活性炭相比,木质活性炭具有更高的比表面积($1696.40 \text{ m}^2/\text{g}$)和孔容量(1.46 cc/g),因此更有利于污染物在活性炭表面的扩散。这主要是由于活性炭的动力学吸附过程主要是由膜扩散、内扩散和孔内吸附3个阶段实现的,而由于第3个吸附阶段可以很快发生,因此动力学吸附速率就主要由第1阶段膜扩散和第2阶段内扩散所决定。其中,膜扩散主要与活性炭的比表面积、孔隙率以及污染物的浓度成正比,内扩散主要与颗粒粒径的平方成反比。因此,提高活性炭的比表面积和孔隙率就会增加活性炭的对污染物的膜扩散速率,进而提高活性炭的吸附速率。

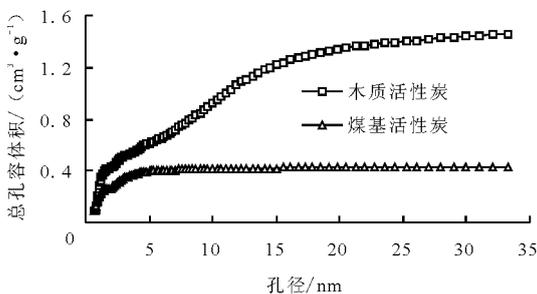


图7 两种活性炭的孔容随孔径变化曲线

同时,由表2可知,木质活性炭的中孔含量(1.020 cc/g)高于微孔含量(0.615 cc/g),而煤基活性炭正好相反,与中孔含量(0.086 cc/g)相比,其微孔含量(0.394 cc/g)更高一些,这主要是由于两种活性炭的活化方式不同,因此导致其不同的孔径分布情况。另外,以上结果说明,污染物在木质活

炭上主要吸附在中孔上,而煤基活性炭主要吸附在微孔内。

表2 两种活性炭比表面积及孔容孔径分布

活性炭类型	微孔/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	中孔/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	总孔容/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
煤基	0.394	0.086	0.480	928.165
木质	0.615	1.020	1.635	1696.399

3.2 活性炭的红外分析

图8为两种活性炭的红外吸收光谱图,其中,波数 $3000 \sim 3600 \text{ cm}^{-1}$ 为Ar-OH的伸缩振动峰(如酚羟基), $1000 \sim 1400 \text{ cm}^{-1}$ 为C-OH的伸缩振动峰(羟基), $1600 \sim 1750 \text{ cm}^{-1}$ 为C=O的伸缩振动峰(羰基)。可以看出,木质活性炭的酸性含氧官能基团C-OH(0.144)和Ar-OH(0.2394)的吸光度都比煤基活性炭(0.0204 、 0.095)高,这一结果说明,酸性含氧官能基团的增加提高了木质活性炭对人工湖中叶绿素a、COD和浊度的去除效果。

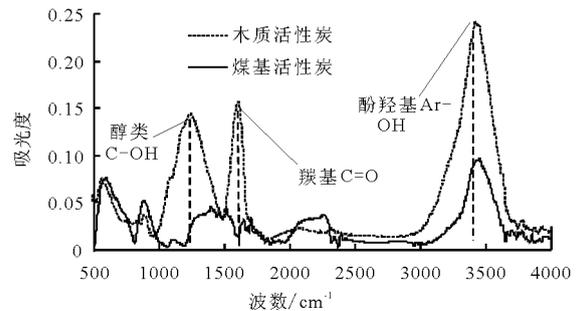


图8 两种活性炭的红外吸收光谱图

3.3 活性炭元素分析

表3为两种活性炭的元素分析结果,可以看出,木质活性炭的总的含氮量和含氧量(1.188% 和 21.745%)均比煤基活性炭的(0.93% 和 13.955%)高,说明活性炭表面较高的含氮量和含氧量有助于提高其对污染物的去除效果。结合FTIR结果可知,木质活性炭表面较高的含氧量主要是由酚羟基和醇羟基贡献的,同时,木质活性炭表面也有较多的含氮官能基团,为木质活性炭对污染物的吸附提供了更多的吸附点位。

综上所述,与煤基活性炭相比,木质活性炭具有更高的比表面积、中孔孔容量,提高了其对人工湖中污染物的物理吸附作用;同时,木质活性炭表面较高的酸性含氧官能基团和含氮官能基团也增强了其对污染物的化学吸附作用。因此,木质活性炭对人工湖中叶绿素a、COD和浊度去除效果更好。

表3 两种活性炭的元素分析

活性炭	含量/%			
	C	N	O	S
煤基	83.4 ± 0	0.93 ± 0	13.955 ± 0	0.836 ± 0
木质	74.05 ± 0.03	1.188 ± 0.001	21.745 ± 0.033	0.141 ± 0.001

4 水体富营养化长期治理建议

活性炭法是一种针对封闭水体富营养化的短期治理技术。因此,为了实现包头市人工湖水体富营养化的长期有效治理,本研究提出了水生生物与水生动物相结合的生态修复建议。

水生植物法^[21-38]主要是通过利用植物及其根际圈微生物体系的吸收、挥发、转化和降解的作用机制,清除环境中污染物质的技术,可采用的植物有莲属、芦苇、浮萍、水葫芦、金鱼藻、黑藻和凤眼莲等,可以大量吸收水体中的氮磷;不仅可直接回收固定能源,还不产生有害物质,并且可以美化景观。水生动物法^[36-38]主要是通过放养食浮游植物和浮游动物的鱼类并辅以田螺、贝壳等小动物;可搭配放养鲢鳙鱼,也可直接投加浮游动物,既可控制水体富营养化,又可产生经济效益。北京市奥林匹克公园人工湖^[39]即采用动植物结合的方法,动物有鸭、鹅和鸳鸯,植物采用菖蒲、荷花和芦苇等,治理效果好,且具有很好的美观价值和生态价值。

因此,结合已有研究结果和实际案例,包头市人工湖水体富营养化的长期生态修复建议如下:

(1)首先,向人工湖中投加水生植物菖蒲和芦苇,它们是北方地区水体富营养化普遍使用的水生植物。由于这些水生植物具有较多的叶片和发达的根系,比表面积较大,因此有利于植物叶片和根系通过吸附、吸收和沉淀来去除 N、P 和浮游植物,从而达到净化水体的目的。

(2)其次,以合适的比例向人工湖中投入水生动物鳙鱼和鲢鱼。其中,鳙鱼是主要捕食浮游物的,而鲢鱼主要是捕食浮游植物的,在这两种鱼类的联合作用下就可以有效控制富营养水体中浮游动植物的生长,且当鲢鱼和鳙鱼的有效生物量达到 46 ~ 50 g/m² 时,抑制水华的效果最好。

总之,通过水生植物和水生动物联合投加的方法,不仅可以达到长期治理水体富营养化的效果,而且具有节约成本、美化环境等优点。

5 结论

(1) 基于对包头市劳动园和植物园两个典型人

工湖的水体富营养化现状分析,发现两个人工湖均存在水体富营养化问题,其中劳动园水体富营养化更加严重,达到了富营养化程度(SL395-2007),阿尔丁植物园达到了中级营养化。

(2) 采用活性炭法可明显改善两个人工湖的水体富营养化现象。木质活性炭对劳动园人工湖水体中叶绿素 a、COD 和浊度的去除效果更好,去除率分别可达到 100%、72.75%、95.66%。这主要是由于木质活性炭表面具有更大的比表面积(1 696.399 m²/g)、孔容量(1.635 cc/g)和酸性含氧官能基团(0.383%),从而提高了其对水中污染物的扩散速率和吸附去除活性;煤基活性炭对劳动园人工湖中总氮和蓝藻的去除率分别为 87.78%、97.7%,出水水质达到地表水环境质量标准(GB3838-2002)二级标准。因此,活性炭技术为短期治理封闭水体中的水体富营养化提供了理论依据。

(3) 结合已有研究结果和实际案例,提出了同时向人工湖中投入水生动物和水生植物的生态修复方法,以期为长期有效治理人工湖水体富营养化提供帮助。

参考文献:

- [1] 梁健. 双龙湖水体富营养化模型及综合治理技术方案研究[D]. 重庆:重庆大学,2002.
- [2] 王迎春,任天志,王立刚,等. 北京市水体富营养化的成因与治理对策分析[J]. 中国农业资源与区划,2005,26(3):40-44.
- [3] 王庭健,苏睿,金相灿,等. 城市富营养湖泊污染底泥中磷负荷及其释放对水质的影响[J]. 环境科学研究,1994,7(4):12-19.
- [4] 李安峰,潘涛,杨冲,等. 水体富营养化治理与控制技术综述[J]. 安徽农业科学,2012,40(16):9041-9044+9062.
- [5] 解岳. 城市富营养化景观水体的植物修复机理及现场试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011.
- [6] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京:化学工业出版社,2001.
- [7] 濮培民,王国祥,胡春华. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗[J]. 湖泊科学,2000,12(3):269-279.
- [8] 张海昆. 活性炭技术在水厂改造中应用的试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.
- [9] 刘益萱,钟亮洁. 颗粒活性炭在饮用水深度处理中的应用[J]. 给水排水,2001,27(3):12-15.
- [10] 张天健. 活性炭在我国饮用水处理中的应用研究进展[J]. 生物质化学工程,2009,43(2):54-60.
- [11] 金政华,赵萌. 活性炭技术在饮用水深度处理中的应

- 用研究进展[J]. 化学与生物工程, 2011, 28(10): 16 - 20 + 38.
- [12] 乔玉玲, 汪永辉, 薛罡. 臭氧在饮用水处理过程中的应用[J]. 中国资源综合利用, 2006, 24(3): 35 - 37.
- [13] 徐轶群, 熊慧欣, 赵秀兰. 底泥磷的吸附与释放研究进展[J]. 重庆环境学, 2003, 25(11): 147 - 149.
- [14] 李亚威. 大型植物过量生长型的富营养化湖泊 - 乌梁素海[J]. 内蒙古环境保护, 2002, 14(2): 3 - 6.
- [15] 周杰, 章永泰, 杨贤智. 人工曝气复氧治理黑臭河流[J]. 中国给水排水, 2001, 17(4): 47 - 49.
- [16] 马文漪, 杨柳燕. 环境微生物工程[M]. 南京: 南京大学出版社, 1998.
- [17] 李勇, 王超. 城市浅水型湖泊底泥磷释放特性实验研究[J]. 环境科学与技术, 2003, 26(1): 26 - 28.
- [18] 王瑛, 李晓兵, 王婷婷, 等. 纳米活性炭纤维修复富营养化景观水体的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(1): 82 - 85.
- [19] 杨清海. 中国富营养化水体修复技术进展[J]. 辽东学院学报(自然科学版), 2008, 15(2): 71 - 77.
- [20] 王士芬. 湖泊水藻类的去除方法[J]. 污染防治技术, 2000, 13(1): 23 - 25.
- [21] 高吉喜, 杜娟. 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.
- [22] 温志良, 毛友发, 陈桂珠. 香蒲植物在环境保护中的开发利用[J]. 资源开发与市场, 2000, 16(5): 284 - 285.
- [23] 陈繁忠, 丁爱中, 朱好根. 光合细菌净化养殖池水质的模拟研究[J]. 上海环境科学, 2000, 19(9): 437 - 438 + 443.
- [24] 戴莽, 倪乐意, 谢平, 等. 利用大型围隔研究沉水植被对水体富营养化的影响[J]. 水生生物学报, 1999, 23(2): 98 - 101.
- [25] 赵晓光, 赵雪. 城市景观水体富营养化快捷评价方法的研究——以西安市为例[J]. 安全与环境工程, 2006, 13(3): 36 - 39.
- [26] 赵新华, 赵胜跃, 张信阳, 等. 景观河流(津河)水质变化的研究与控制[J]. 天津大学学报, 2005, 38(9): 824 - 829.
- [27] 王国祥, 成小英, 濮培民. 湖泊藻型富营养化控制 - 技术、理论及应用[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 273 - 282.
- [28] 周均. 江苏水生态恢复中的新技术应用[J]. 水利技术监督, 2004, 12(2): 49 - 51.
- [29] 马有启, 田村学造(日). 生物净化环境技术[M]. 东京: 东京大学出版社, 1980.
- [30] Paul E A, Clark F E. Soil microbiology and biochemistry (Secend Edition)[M]. Academic Press, 1996.
- [31] 罗治华. 生态浮床技术对富营养化水体的净化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- [32] 汪文强, 王子芳, 高明. 5种水生植物的脱氮除磷效果及其对水体胞外酶活的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10): 5440 - 5446.
- [33] 付晓云, 何兴元. 5种水生植物脱氮除磷能力比较[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(3): 79 - 82 + 91.
- [34] 李先会. 水生植物 - 微生物系统净化水质效应研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [35] 李先会, 朱建坤, 施练东, 等. 富营养化水体细菌去除氮磷能力研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(4): 28 - 32.
- [36] 汤显强, 李金中, 李学菊, 等. 7种水生植物对富营养化水体中氮磷去除效果的比较研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(2): 8 - 14.
- [37] 宋关玲. 生物修复技术在水体富营养化治理中的应用[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(27): 8597 - 8598.
- [38] 赵生成, 崔树生, 王绍斌. 污染水体原位就地修复技术研究与应用[J]. 中国水利, 2004, (11): 20 - 22.
- [39] 吴东敏, 邓卓智, 杨玲. 奥林匹克公园的水空间[J]. 水利水电技术, 2009, 40(11): 5 - 9 + 22.