

东湖水环境污染因素与整治措施

熊志平

(湖北大禹水利水电建设有限责任公司,湖北 武汉 430050)

摘要:应用主成分分析原理,按照主成分提取的信息,超过原始信息84%的原则,研究东湖污染物来源、扩散、迁移、沉淀、聚积的动态变化规律,以采取有效措施来减轻污染。对东湖的子湖——郭郑湖、汤林湖、庙湖等分别进行分析,其结果表明,东湖的郭郑湖:第一类污染源是来自于湖区周围的工业尘埃,占56%;第二类污染源是来自于交通尾气、生活污水和雨水片流,占16%;第三类污染源是来自于电镀、印刷等工业废水,占12%。与汤林湖相比,郭郑湖的污染程度高于汤林湖。庙湖沉积物的分析表明,总磷、不稳态磷、铝结合磷和铁结合磷含量随深度增加而降低,在表层0~10 cm有富集现象。并经过对东湖实施截污、清淤和引江灌湖等治理措施后,使其水环境得到显著地改善,为湖泊环境防治、管理提供了重要科学依据。

关键词:武汉东湖;湖泊沉积物;重金属元素;磷形态;环境管理

中图分类号:S274.3 **文献标识码:**B

Study on Water Environment Pollution Factors and Renovation Measurements of the East Lake

XIONG Zhi-ping

(Hubei Dayu Water Resources & Hydroelectric Construction Co., Ltd, Wuhan 430050, China)

Abstract: Based on principal component analysis method, according to the rule that the information picked by principal component exceeds 84% of original information, the dynamic change law of source, diffusion, transfer, deposition and accumulation of contaminant of the East Lake was studied in this paper to reduce the pollution through effective measure. Three child lakes of the East lake, namely Guozheng Lake, Tanglin Lake and Miaohu Lake were studied. The results indicated that for the Guozheng Lake, the first pollution source was from industrial coal dust around the lake, which accounted 56% of the whole source, the second one was from tail gas, domestic sewage and rain flow, which accounted for 16%, and the third one was from industrial sewage, such as electroplate, press, and so on, which accounted for 12%. Contrasted with Tanglin Lake, the pollution degree of Guozheng Lake was seriously. The analysis of sediment of Miaohu Lake indicated that the content of TP, LP, Al-p and Fe-P decreased with the increase of depth, and was rich in the upper 0~10 cm sediment layers. Through the measures of sewage interception, cleaning up silt and diverting Yangtze River to the Lake, the water environment of the East Lake was remarkably improved. This will provide important scientific basis for the management and renovation of the lake environment.

Key words: the East Lake; lake sediments; heavy metal elements; phosphorus fractionation; environmental management

武汉东湖是国家一级风景名胜区,它是长江中下游的一个典型的城郊中型浅水湖泊,位于武昌东北部的珞珈山麓。水面面积约32 km²,平均水深约2.3 m,是武汉市的一个重要水源地和渔业基地。东湖水域周围人口密度不断增加,目前湖区人口已增加到10多万人,人口密度已超过2万人/km²,加之工农业生产、水产养殖以及旅游业的迅猛发展,大量营养物质进入湖泊水体,使湖水的富营养化程度加剧;而造成东湖水质恶化与富营养化日趋严重的原因,除去外源污染外,还有水体的过度分割以及分割之后的过度开发(如渔业、旅游)。近年来,武

汉钢铁工业与周边的印刷工业等高污染企业的发展以及生活污水的排放,导致东湖重金属的污染呈加重趋势;东湖截污工程实施后,城市周围水域的富营养化程度明显改善,化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)和总磷(TP)显著降低,为环境治理和保护提供科学依据。

1 样品采集与测试分析

2003年11月,从郭郑湖、汤林湖底泥沉积物的0~7 cm处,分别采集38和37个样品,在试验测试中心利用X射线荧

光谱仪 SRS-303 做重金属分析,揭示湖泊沉积物中重金属的变化特征^[1];2004 年 4~6 月,在庙湖底泥沉积物中采集 4 个样品,在实验室自然风干、研磨、过 100 目筛,测试分析水样中的总磷(TP)、溶解性总磷(TDP)、溶解性磷酸盐(PO₄-P)和沉积物中的总磷(TP)、不稳态磷(LP)、铝结合磷(AL-P)、铁结合磷(Fe-P)、钙结合磷(Ca-P)、闭蓄磷(OcP)及有机磷的垂向变化规律;2005 年,东湖截污工程全部投入使用,选择郭郑湖和水果湖样品点,尤其是水果湖排污口和风光村排污口截污前后的化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)及总磷(TP)等污染因子都有显著降低,明显地改善了东湖水环境。

2 结果分析

2.1 东湖沉积物中的重金属分布特征

2.1.1 重金属分布的不均匀性

武汉钢铁公司距汤林湖约 2 km,估计每年约有 2t 的烟尘飘落东湖^[2]。图 1 显示,东西(WE)剖面从郭郑湖的黄鹬湾开始,到磨山风景区结束,取样 39 个;南北(NS)剖面从武汉大学开始到小潭湖结束,在郭郑湖、汤林湖分别采样 38 和 37 个,共采集 114 个中选择 30 个样品做金属分析,其分析因素有: Zn、V、Ti、Pb、Ni、Mn、Cr、Cu、Co、Ba、TFe 和 P 共 12 种。从南到北,锰(Mn)的含量逐渐增加;锌(Zn)的含量逐渐减少;磷(P)的含量变化剧烈。对于郭郑湖来说,湖心的铅(Pb)含量较低,而周围高;铬(Cr)为湖心高,而周围低;铅(Pb)、钴(Co)、钛(Ti)、铜(Cu)是东高西低。对于汤林湖,重金属铜(Cu)、钡(Ba)、钴(Co)、铬(Cr)、钒(V)、锰(Mn)、钛(Ti)、镍(Ni)、全铁(TFe)均是湖中心含量高。郭郑湖东部水面为娱乐区域,每年都有众多的游客乘汽艇观光、游览,水质呈中偏碱性(pH 值为 8.0),铬(Cr)离子极易被有机质吸附而沉淀于湖底^[3]。

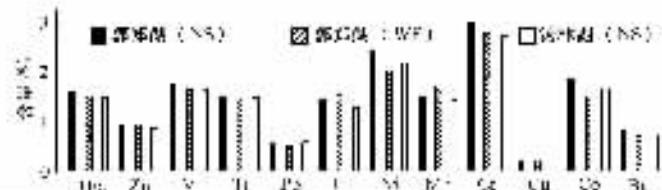


图 1 东湖沉积物南北剖面的重金属变化趋势

由表 1 可知,有机质磷在各点位之间元素含量变化最大,变异系数为 0.39,这与湖泊富营养程度有关;钛(Ti)的元素含量变化最小,变异系数为 0.05,是典型的地壳元素^[4]。郭郑湖沉积物中的全铁(TFe)、锌(Zn)、钒(V)、钛(Ti)、磷(P)、锰

表 1 东湖沉积物重金属含量的统计结果

元素	郭郑湖			汤林湖		
	变化范围	平均值	变异系数	变化范围	平均值	变异系数
TFe	49.4~82.1	72.9	0.12	32.1~78.1	68.6	0.19
Zn	104~77	141.1	0.1	104~148	128.7	0.11
V	85.8~149	130.9	0.12	66.8~140	122.9	0.16
Ti	4 371~5 549	5 151.7	0.05	4 131~5 484	5 118	0.07
Pb	30.6~47.9	39.1	0.14	25.9~48.9	42.9	0.14
P	549~1 566	898.7	0.38	548~1 552	767.9	0.39
Ni	25.8~50.8	42.6	0.15	20.3~48.4	40.2	0.19
Mn	712~1 610	1 116.3	0.18	590~1 610	1 000.2	0.25
Cr	77.5~114	103.1	0.1	71.5~105	94.8	0.1
Cu	38.9~63.7	55.5	0.11	33.4~65.1	55.2	0.18
Co	17.1~26.5	22.4	0.11	12.7~26.5	21.4	0.17
Ba	441~712	617.8	0.12	364~663	579.8	0.14

注:①TFe 的单位为 g/kg,其余元素的单位为 mg/kg,变异系数无量纲。②水系沉淀物成分分析标准(2004 年 9 月 20 日):Zn(153)、V(76.4)、Ti(3 500)、Pb(73.9)、P(616)、Ni(18.6)、Mn(718)、Cr(35)、Cu(309)、Co(13)、Ba(818)、TFe(46.4)。

(Mn)和铬等 7 种元素的含量高于汤林湖,表明郭郑湖的沉积物比汤林湖污染更严重,更富营养化,说明人类活动对郭郑湖的影响更大^[5]。

2.1.2 重金属污染物来源分析

重金属污染物主要来源于人类生产、生活排放的废水、废气、废物^[6]。根据主成分分析原理,确定东湖沉积物 12 个元素的主要污染源类型。所谓主成分分析就是把一些具有错综复杂关系的变量,归结为数量较少的几个综合变量的一种多元统计方法,其表达式为:

$$F_i = u_{i1}x_1 + u_{i2}x_2 + \dots + u_{im}x_m$$

式中: u_{ij} 为主成分荷载系数,它的大小表示主成分与变量之间的相关程度。

变量之间的相关系数矩阵特征值对应的特征向量即为主成分荷载系数^[7]。当最大的 m 个特征值之和占全部特征值之和的比重大于 84%时(第一类污染源占 56%,第二类污染源占 16%,第三类污染源占 12%,三者之和占 84%),就意味着 m 个特征值对应的主成分提取的信息占原始信息的 84%。荷载系数的计算是采用 SPSS10 统计软件来完成的,见表 2。

表 2 东湖沉积物污染源因子荷载矩阵

主成分	Zn	V	Ti	Pb	P	Ni	Mn	Cr	Cu	Co	Ba	TFe	比例/%	
郭郑湖	1	0.14	0.86	0.34	-0.17	-0.72	0.93	-0.43	0.87	0.43	0.54	0.93	0.84	56.0
	2	0.23	-0.02	0.02	0.90	0.41	0.16	0.08	0.14	0.71	0.67	0.14	0.04	16.3
	3	0.91	0.17	-0.04	0.19	-0.034	0.12	-0.68	0.42	0.24	-0.23	0.14	0.29	11.9
汤林湖	1	0.27	0.97	0.95	0.13	-0.33	0.96	0.54	0.92	0.93	0.81	0.97	0.95	64.6
	2	-0.73	-0.19	-0.21	0.06	0.84	-0.12	0.75	-0.23	-0.25	0.29	-0.08	0.1	17.4
	2	0.34	0.01	-0.18	0.95	0.25	0.14	0.19	0.3	0.21	0.26	0.12	0.07	9.4

郭郑湖沉积物(主成分)提取 3 种类型污染源:第一类污染源(占 56%)是与燃煤尘埃有关的金属元素镍(Ni)、钡(Ba)、铬(Cr)、钒(V)、全铁(TFe)、钴(Co)关系密切,相关系数大于 0.84,与磷(P)反相关(-0.72),它不可能来自于与有机质相关的污染物,据推测来自于湖区周围的武汉钢铁公司、青山热电厂的工业燃煤尘埃^[8];第二类污染源(占 16%)是与金属元素铅(Pb)、铜(Cu)、钴(Co)的相关系数较高,相关系数大于 0.67,与磷正相关(0.41),Pb、Cu、Co 的含量既有污水排放、雨水片流,又有一部分汽车尾气沉降而引起的;第三类污染源(占 12%)与锌(Zn)关系极其密切(相关系数 0.91)。Zn 主要来自于电镀、印刷、垃圾焚烧等行业的污水,与铬(Cr)关系中等(相关系数 0.42),Cr 来自于电镀、皮革、制药、颜料等工业污水,与磷(P)负相关(-0.34)。以同样的方法分析汤林湖的污染源,其结果表明,郭郑湖的污染程度高于汤林湖。

2.2 东湖污染因子磷的垂向分布规律

2.2.1 上覆水中磷形态的含量和分布

在庙湖湖区 4 个样点采集沉积物和上覆水样品,水样中总磷(TP)、溶解性总磷(TDP)和溶解性磷酸盐(PO₄-P)的分析参照《水和废水监测分析方法》^[9]。上覆水中总磷(TP)、溶解性总磷(TDP)、溶解性磷酸盐(PO₄-P)的形态含量,如图 2 所示。

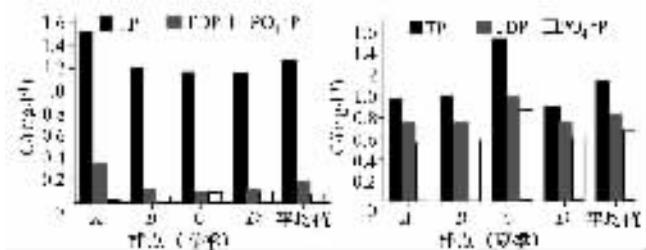


图 2 春、夏两季东湖上覆水中各种磷形态的含量

图 2 中显示,春季湖水总磷(TP)的含量范围为 1.14~1.52 mg/L,平均值为 1.25 mg/L,高于国家标准近 6 倍,属极富营养化水体^[10]。其中溶解性总磷(TDP)占总磷(TP)的 13.6%,溶解性磷酸盐(PO₄-P)只占总磷(TP)的 4.64%,春季以颗粒态形式存在,夏季以溶解态形式存在。

夏季湖水总磷(TP)含量为 0.87~1.56 mg/L,平均值为 1.11 mg/L;溶解性总磷(TDP)占总磷(TP)的比例上升为 71.17%;溶解性磷酸盐(PO₄-P)占总磷(TP)的 59.46%。这种变化的主要原因是由于夏季微生物、藻类和其他水生生物活动显著增加,使水体 PH 值升高,溶解氧的渗透深度减少,沉积物处于弱还原环境所导致的磷产生释放,并以无机态磷酸盐的形式进入水体。同时,有机物在微生物的作用下也可转化为无机磷释放出去^[11],而且,藻类和其他水生植物的生长、繁殖、同化也吸收了大量的磷,因此水体中总磷的浓度并未升高。

2.2.2 沉积物中各种磷形态的垂直分布特征

沉积物中 TP、LP、AL-P、Fe-P、Ca-P、OCP(闭蓄磷)和 Org-P(有机磷)的测定,参考《湖泊营养化调查规范》(第二版)。根据监测数据,在沉积层深为 0~30cm 的范围内,总磷(TP)含量分布在 138.4~2 703 μg/g 之间,平均值为 685 μg/g;不稳态磷(LP)分布在 0.31~11.03 μg/g 之间,平均值为 2.46 μg/g;铝结合磷(AL-P)分布在 7.74~274.73 μg/g 之间,平均值为 56.03 μg/g;铁结合磷(Fe-P)分布在 22.26~1 282.54 μg/g 之间,平均值为 310.57 μg/g。这 4 种磷形态的变化趋势较相似,在 0~10 cm 范围内,随着深度的增加其含量迅速下降,大于 10 cm 后其递减幅度减弱,其中总磷(TP)在 0~10 cm 阶段的含量下降幅度达 78.22%。湖泊沉积层中总磷的这种表层富集现象,与居民生活和工农业废水的大量输入有机磷有关,说明近年来有大量含磷物质的输入累积于沉积层,也可能是早期受成岩改造作用的结果。

夏季沉积物中总磷(TP)、不稳态磷(LP)、铝结合磷(AL-P)和铁结合磷(Fe-P)的剖面分布,如图 3 所示。A、B 两点的铝结合磷(AL-P)在 2~10 cm 间的的变化趋势相近,即先下降再上升,又迅速下降;10 cm 后 B 点随深度增加而缓慢地升高,20 cm 处达到峰值,后又随深度增加而逐渐减小;A 点在大于 10 cm 深度的范围内,有明显的起伏下降趋势。C、D 两点的铝结合磷(AL-P)递减较为平稳;C 点的铁结合磷(Fe-P)垂向减小幅度不大;A 点的铁结合磷(Fe-P)虽整体有下降趋势,但变化起伏强烈,到 22 cm 后才出现平稳的递减趋势。

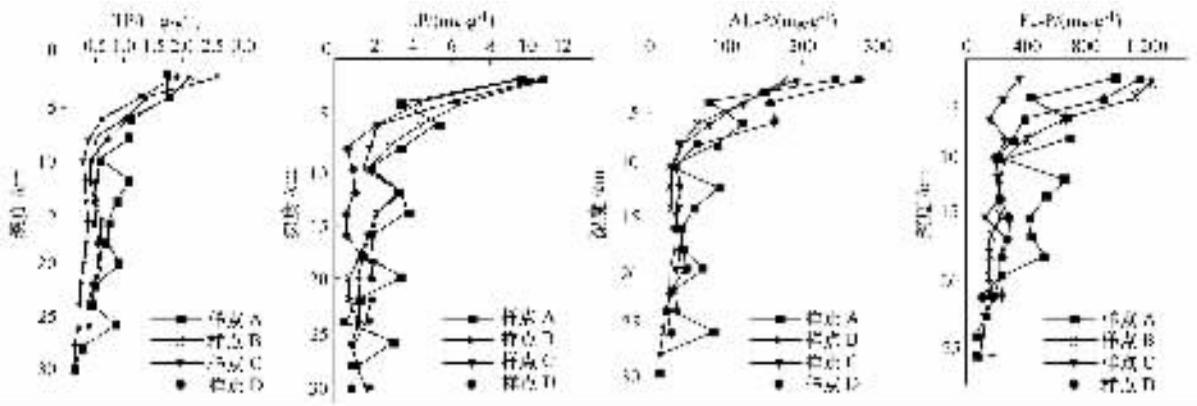


图 3 东湖沉积物中各种磷形态含量的剖面分布图(夏季)

东湖的子湖——庙湖,其采样点出现磷形态分布的差异性,主要与其所在的地理位置有关。A 点受水流、风流的影响较大,使磷的含量变化剧烈,沉积物的性质与其他采样点相差较大;B 点附近有开垦的农田,受人类活动干扰较大,不断出现

“湖泛”现象,底泥沉积物不断向水体释放污染物;C、D 两点处于湖中开阔地带,受到干扰相对较少。相关性分析显示,铝结合磷、可交换磷、铁结合磷与总磷含量呈显著正相关。目前在湖底沉积物中有部分磷的活动性较强,使其可能成为水体营养

盐的重要来源,而造成持续性的湖泊富营养化问题。

2.3 东湖治理措施

2.3.1 截污工程实施效果

(1)截污前后流场水质变化。1998年,武汉市利用世界银行贷款来治理城市污水,主要内容是通过工程措施截断污水,减轻东湖污水负荷,以达到改善东湖水质的目的。东湖水体污染负荷主要来自点源污染、面源污染和底泥释放等方面。2005年截污工程可以全部投入使用。截污前,在排污口附近水域,水质污染日益恶化,如水果湖排污口第6采样点的生化需氧量(BOD)、化学需氧量(COD)和总磷(TP)浓度,在第13天分别提高50%、3.9%和15.2%,湖区中心的郭郑湖水域由于水体自净能力强,污染浓度相对比水果湖低。

东湖截污流场模拟情况如图4和图5所示。图中显示,截污前的水果湖排污口、风光村排污口和天鹅湖排污口及其水域的污染浓度等值线密集,排污口处相对更集中,表示污染物的浓度高、污染严重,是防治水体污染的中心区域;截污后整个图面的污染物浓度场的等值线变得非常稀疏,除了排污口还有较集中的等值线外,其余显得格外稀疏,说明污染浓度已大幅度降低,证明截污工程治理湖水污染的措施是非常有效的。



图4 2005年不截污东湖流场图



图5 2005年截污后东湖流场图

(2)截污后采样点的水质变化。东湖的水果湖水域第6样品点,生化需氧量(BOD)浓度,截污后的第13天,由16.72 mg/L下降到15.04 mg/L,降幅为10.04%;化学需氧量(COD)浓度,由39.71 mg/L下降到23.3 mg/L,降幅为41.3%;总磷(TP)浓度下降幅度为18.4%,如图6~图8所示。图中显示,截污工程效果明显,东湖水域水质参数得到明显改善,生化需氧量(BOD)、化学需氧量(COD)和总磷(TP)的平均值可下降

50%左右。

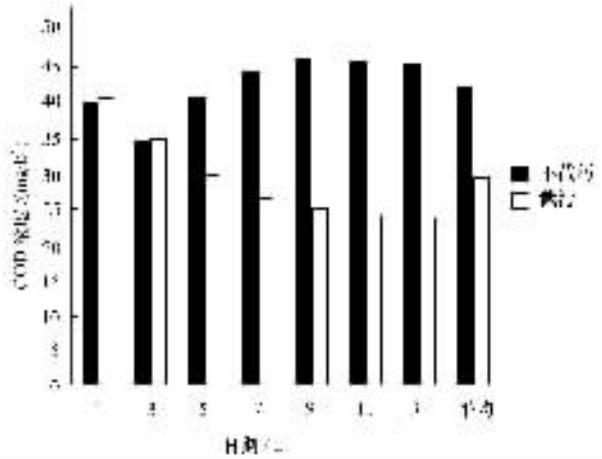


图6 截污与不截污第6点COD浓度对照图

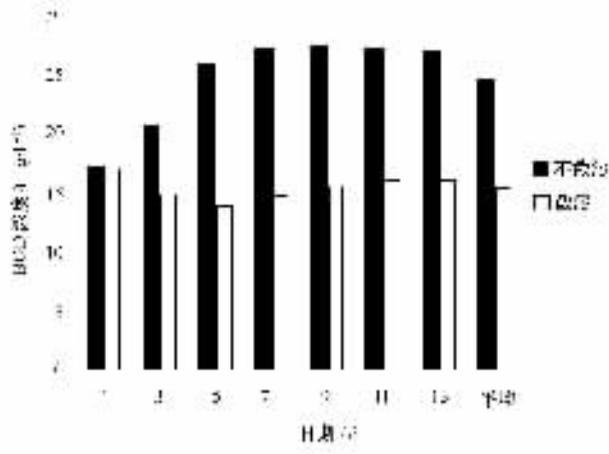


图7 截污与不截污第6点BOD浓度对照图



图8 截污与不截污第6点TP浓度对照图

2.3.2 引江灌湖治理措施

现有9.4 km长的东湖港与长江沟通,江边有两孔宽3.25 m的排水闸(武丰闸还可供武钢工业用水)和武钢建的两座泵站(扬水能力为75 m³/s,武钢实际用水流量37 m³/s),这些为东湖自长江引水灌湖创造了基本条件。

根据长江多年平均水质资料,生化需要氧量(BOD)浓度为1.1 mg/L,化学需氧量(COD)浓度为1.5 mg/L,假如从长江引水流量为10 m³/s,注入东湖,连续引水13天后,模拟结果表明,东湖东部水域的生化需氧量(BOD)浓度 (下转第19页)

被为主体的消落带湿地生态系统能分解吸收库区水体中的营养物质,减少库区的富营养化水平;消落带生态系统是河流生态系统的重要组成部分,其健康状况直接影响到大量生物的生存;消落带植被有固定河岸的作用,能防止堤坡因河水的冲刷而崩垮。

5 水生植物的资源化利用

所有水生植物体都可以作为能源,即产生沼气加以利用。有些水生植物还可以食用,如莲藕、菱角等。茭子菜、芦苇、荇菜等可以入药。芦苇可以编制苇席,这已是白洋淀人民经济支柱。水生植物是良好的绿肥,又是好的饲草,它们营养丰富,生长很快,水中的氮、磷被它们吸收后转化成蛋白质等营养物质。如果用这些草来养鱼、养鸭、养鹅又能产生一定的经济效益。所以在种植水生植物时,可有目的地挑选一些利用价值较高的水生植物如绿萍、浮莲、水花生、水葫芦等。再在水中放养适量鱼虾和水禽,适时收获水产品,使水体保持一个较为稳定生态环境,从而获得环境效益和经济效益双丰收。

在实际应用中,尽量采用后期有较大经济价值的水生植物,是非常必要的。由文辉等^[13]在富营养化水体中,轮种水芹和水菜菜,可在水中移除掉 TN 204.80 g/(m²·a), TP 24.62 g/(m²·a),同时又可收获蔬菜 50 kg/m²,具有显著的环境效益和经济效益。

6 结语

植物修复技术是一项新兴的绿色污染治理技术,它尽管起步较晚,但由于投资相对较低,兼具修复、保护和美化环境的功能,其研究与应用已引起各国政府和科学工作者的高度重视,被认为是一种很有前途的生物修复技术之一。

由于植物修复技术是一个崭新的研究领域,还存在许多问题有待进一步的发展与完善,如处理时间长、占地面积大及受气候影响严重等。建立更多的应用植物修复技术的示范性基地,取得经验后加以推广。在应用研究的同时,深化应用基础研究。

希望这一新兴“绿色”技术能与地方生态治理工程项目相结合进行推广、服务于社会,这将对我国的环境污染防治、生态

恢复重建有着重大的现实意义和深远的历史意义,因而有着广阔的应用前景和推广价值。

参考文献:

- [1] 培 民. 健康水生生态系统的退化及其修复理论、技术及应用[J]. 湖泊科学, 2001, 13(3): 193-203.
- [2] 李文朝. 东太湖沉积物中氮的积累与水生植物的沉积[J]. 中国环境科学, 1997, 17(5): 418-421.
- [3] Dean, et al. Advancing research for bioremediation[Z]. Environ Prog, 1992, 3.
- [4] Shunroku Nakamura. "Design with Nature" in nature-oriented river works in Japan[R]. Int. WS for Eco-hydraulics & Eco-rivers Engineering, Taiwan, 2003.
- [5] 丁则平. 日本的湿地净化技术——人工浮岛(AFD)[DB/OL]. 《观念》网刊, 2005.
- [6] 郭培章, 宋 群. 中外水体富营养化治理案例研究[M]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [7] Garba L, Jacques B, Linda D et al. Nitrogen and phosphorus removal in a subsurface-flow reed bed[J]. Water Quality Research Journal of Canada, 1998, 33(2): 319-329.
- [8] Michael M, Robert H. The design and performance of a vertical flow reed bed for the treatment of high ammonia low suspended solids organic effluents[J]. Wat. Sci. Tech, 1997, 35(5): 197-204.
- [9] 靖元孝, 陈兆平, 杨丹菁. 风车草对生活污水的净化效果及其在人工湿地的应用[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(6): 614-617.
- [10] 崔理华, 朱夕珍, 骆世明. 煤渣—草炭基质垂直流人工湿地系统对城市污水的净化效果[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 597-600.
- [11] 尹澄清, 兰智文, 晏维金. 白洋淀水陆交错带对陆源营养物质的截留作用初步研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(1): 76-80.
- [12] 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.
- [13] 由文辉. 水生经济植物净化受污染水体研究[J]. 华东师范大学学报, 2000, (1): 99-102.
- [14] 张洪刚, 马安娜, 洪剑明. 垂直流人工湿地的设计及净化功能初探[J]. 节水灌溉, 2006, (6).
- [5] 杨 洪, 易朝路, 谢 平, 等. 人类活动在武汉东湖沉积物中的记录[J]. 中国环境科学, 2004, 24(3): 261-264.
- [6] Ta W, Xiao Z, Qu J. Characteristics of dust particles from the desert/Gobi area of northwestern China during dust-storm periods [J]. Environmental Geology, 2003, 43: 667-679.
- [7] 杨丽萍, 陈发虎. 兰州市大气降尘污染物来源研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 499-502.
- [8] 张 晶, 陈宗良, 王 玮. 北京市大气小颗粒物的污染源解析[J]. 环境科学学报, 1998, 18(1): 62-67.
- [9] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 第3版. 北京: 中国环境科学出版社, 1989, 280-285.
- [10] GB3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [11] 朱广伟, 秦伯强, 高 光. 浅水湖泊沉积物磷释放的重要因子铁和水动力[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 762-764.

(上接第 16 页) 由引水前的 5~6 mg/L 下降到 1~2 mg/L; 东湖西部水域的生化需氧量(BOD)浓度亦降到 4~5 mg/L, 化学需氧量(COD)浓度也有类似于生化需氧量(BOD)浓度的改善。这说明引江灌湖是改善东湖水环境的一项重要措施。

参考文献:

- [1] 苏秋克, 蒋敬业, 姜益善, 等. 武汉城市湖泊环境地球化学研究——以东湖为例[J]. 安全与环境工程, 2003, 10(3): 20-23.
- [2] Charlesworth S, Foster I. Sediment budgets and metals fluxes in two contrasting urban lake catchments in Coventry, UK. Applied Geography, 1999, 19: 199-210.
- [3] 胡瑞春, 刘光强, 金洁理. 武汉东湖湖泊污染地球化学特征研究[J]. 湖北地矿, 2003, 17(4): 26-30.
- [4] 陈 汤, 邢 琪, 陆春霞, 等. 广州市空气可吸入性颗粒物化学元素组成特征[J]. 环境科学研究, 1999, 12(4): 1-5.