

三峡库区次级河流富营养化及其生态治理

肖铁岩,许晓毅,付永川,罗固源

(重庆大学 城市建设与环境工程学院,重庆 400045)

摘要:三峡水库蓄水水位已达 165 米,其水环境性质为半封闭型的缓流水体,水体自净能力下降。库区次级河流水质的状况直接影响着三峡库区的水环境与生态安全。在分析库区次级河流水体富营养化现状与发生条件的基础上,结合国内外河流整治的生态观念和思路,对库区次级河流污水生态工程治理技术进行了初步探讨。

关键词:三峡库区;次级河流;富营养化;生态工程

中图分类号:X171

文献标志码:A

文章编号:1008-5831(2009)01-0005-04

水体富营养化是指缓流水体中营养物质达到某一限值,在其他相关自然、水文条件等因素的共同影响下,水体发生一系列物理、化学和生物的复杂变化,并导致水生生态系统失衡的过程。举世瞩目的三峡工程目前已蓄水至 165m 水位,在其防洪、发电、航运和旅游等方面带来的经济效益正逐步体现的同时,随着干流水环境特性的改变,其水污染过程和自净机制等方面都发生着显著、深刻的变化。库区次级河流的水质状况成为直接影响三峡库区的水环境质量与生态安全的关键因素。笔者在分析库区次级河流水体富营养化的现状、发生条件的基础上,结合国内外治河的生态观念与思路,提出了库区河流小流域生态整治的技术思路,并对次级河流污水治理适宜的生态工程技术进行了讨论。

一、三峡库区次级河流富营养化污染特性

(一)库区次级河流水体富营养化现状

库区次级河流流域多为广阔、起伏绵延的山地,实施污水收集和治理工程造价昂贵而且困难,加之次级河流流域现存的众多工、农业排放点污染源,以及流向众多次级河流的缓坡地面径流形成的面源污染,使库区次级河流的水环境问题特别突出。三峡库区蓄水后,次级河流水体局部河段的水文特征、地质条件、水环境容量及纳污特性等随之改变,主要表现为回水段流速显著降低、水体自净能力下降,纳污容量降低,库区许多典型次级河流局部回水区域水质与底质恶化,并显现出浮游生物种类减少而个体密度加大,鱼类减少甚至死亡等水体富营养化征兆或爆发潜势。近两年的监测结果表明,重庆市境内的 70 条主要次级河流的 172 个监测断面中,不能满足相应水域功能的断面比例约 30% 以上^[1]。龙溪河、小安溪河、濑溪河、梁滩河、苕溪河、龙宝河、五桥河、梅溪河等许多库区次级河流污染严重。主要超标污染物中,总磷、总氮浓度普遍偏高,总磷达劣 V 类的断面所占比例超过 30%,为藻类生长提供了充足的营养盐,水体富营养化潜势较高。此外,由于三峡水库次级河流的开放性特征,次级河流水体富营养化程度存在较明显的地域、区域分异现象,其回水区富营养化的状态或潜势相对更为严重,许多河流入江回水区曾一度出现了长度从几百米到上千米不等的水华带^[2-3]。

收稿日期:2008-05-15

基金项目:科技部国际合作项目(2007DFA90660)

作者简介:肖铁岩(1955-),男,湖南人,重庆大学博士研究生,主要从事资源与环境保护研究。
欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

(二) 库区次级河流富营养化条件分析

从营养盐输入的角度分析,工业污水、村镇生活污水、农田径流、农产品加工废水、养殖废水等任意排放,次级河流沿岸的农村生活垃圾、农作物秸秆、人畜粪便形成固体废弃物、大气湿沉降等,是流域营养盐面源污染负荷的主要来源。据统计,库区典型的15条次级河流中,TN年排放量超过 $3.14 \times 10^5 \text{ t}$,TP年排放量超过 $1.76 \times 10^4 \text{ t}$ ^[3]。根据河流流量作静态粗略分析,并结合现状监测值,库区十余条典型次级河流营养盐输入量已远超过“水华”的临界浓度^[2,4],支流回水段TP平均浓度为 0.148 mg/L (最大浓度达到 1.368 mg/L),TN平均浓度 1.90 mg/L (最大浓度达到 10.06 mg/L),都远远高于湖库水体出现富营养化的TP和TN临界浓度 0.02 、 0.2 mg/L ^[5-6]。库区支流回水区藻类生长具有充足的营养基础^[2],因此,次级河流水体营养盐的输入和有效削减必须引起足够重视。

从水体富营养化的作用机制分析,随着三峡库区水文条件的显著改变,同时受水库回水顶托的影响,次级河流河口一定长度的江段形同缓流湖泊^[7],次级河流流态特征(尤其是河口水文条件)改变,污染物生化降解反应特性等也随之变化。主要表现为,河口区域水体扩散能力变差,水体稀释自净能力和生化反应能力减弱,河口回水腹心区生化反应器水力停留时间增长,污染物尤其是营养盐积存而易于形成水体污染源,水体富营养化的潜势增加等。另一方面,河流富营养化是一个非常复杂的环境生态体系,由于库区众多次级河流具有的相对开放性,藻类爆发生长所涉及的因子就更为复杂。除营养盐负荷这一重要因素外,次级河流回水河段特性与回水水量、气候、水温、铁锰微量元素含量等因素,也是影响次级河流水体富营养化程度、优势藻种比例、“水华”发生或消亡、发生区域扩张或收缩的重要因子^[8-9]。

二、库区次级河流富营养化生态控制技术对策

国外对城市河流的开发和整治先后经历了三个不同的发展阶段^[10],即从初期工程治河阶段对河流

表1 三峡库区次级河流污染综合整治对策分析

认识与理解	污染治理、生态和谐、可持续利用
城市(镇)河流内涵	水文、生态环境、经济、社会、文化综合功能系统
城市(镇)河流外延	小流域系统:水域+河滨+生态+河岸城市(镇)区
河流功能	防洪、供排水、渔业、水质调节、生物多样性、景观多样化
次级河流整治观念	污染治理结合生态环境保护与社会经济的协调、综合发展
技术体系特征	生态评价、生态修复与生态工程、流域总量控制

(二) 构建流域污染生态综合整治的评价指标体系

河流生态系统综合整治效果评价体系的构建是河流生态整治的核心问题之一。近20年来,国际上对河流健康评价的方法学不断发展,形成了一系列较为系统的评价方法^[13-15]。从评价原理的层面,可大致将这些评价方法分为预测模型法和多指标评价法。IBI指数(Index of Biotic Integrity)是一种由美国开发的河流健康评价指标多指标指数,其特点是将测试点生物群落的结构、物种的组成、数量及生物量

系统简单人工化,到污染控制与水质恢复时期侧重于以人工措施治理工业及生活污染,再到现阶段的可持续管理利用时期的生态修复、河流自然化与功能多样化。以生态学观点为指导,采取多学科综合整治的策略,成为当今世界各国流域生态整治技术的总体思路。

(一) 库区次级河流流域生态整治技术思路

从库区次级河流水环境与污染防治现状来看,点源污染的截污、治污与营养负荷减排仍然是一项十分必要的措施,但从非点源污染表现出的产生随机性、影响滞后性和影响因子复杂性的角度,应该通过环境科学、水力学、生态学、园林学等多学科的方法和原理,实现在截污基础上河流水体的自净功能和生态学功能最大化,并引导生态系统向草型生态系统方向发展,恢复次级河流与河岸生态系统的良性循环^[11-12],再现一个自然的、能自我调节的生态平衡系统。结合三峡库区的生态环境状况,从“认识与理解”、“城市河流内涵与外延”、“河流功能”、“次级河流整治”以及“整治系统的技术体系特征”等几个方面,提出三峡库区次级河流水体富营养化综合整治对策的总体思路(表1)。

结合三峡库区次级河流的普遍特点,认为尤其应从小流域的角度考虑次级河流水污染的综合整治;对小流域进行不同河流河段的确定功能定位,针对不同河流的污染和生态环境现状、水文水力条件、流域经济发展水平,按照生态型河道构建和河流的生态系统修复的原则,科学建立小流域水污染综合整治的评价指标体系,遵循再生循环的生态原理,利用生态系统的自我组织、自我调节能力,因地制宜、有针对性地进行小流域不同区域的生态修复重建。对于城市河段应采用截污、生态型河道构建等作为主要的治理措施;对于农村河段,则应考虑发展生态农业,注重控制面源污染、畜禽养殖污染、水土流失及污水的生态工程控制。库区次级河流小流域综合治理技术路线为:污染源调查—污染物转移扩散分析—污染负荷削减与污染物治理—河流生态系统自净—流域生态平衡。

等与参照点对比,得出相应的IBI值,从而得到河流的健康情况。该指标最初用于鱼类群落的评价,后来逐步推广到大型脊椎动物。欧盟开发了健康河流评价指标WFD指标(Water Framework Directive),该指标评价河流的基本原则主要基于河流中的生物(如深水大型无脊椎动物等),河流按类型划分并与其对应的参照类型对照,分“优、良、中、差、特差”5级评价,生物元素应考虑其组成、丰度、无脊椎动物种类多样性水平、敏感的种类与不敏感种类的比例。澳大利亚开发了河流状况指数(ISC:Index of Stream

Condition)评价模式,是一种包括河流水力、物理形式、河岸带、水质、水生动物等5种状况在内的综合指标评价体系。

近年来中国已经开始关注从河流健康状况的视角保护河流,但缘于经济发展水平上的差异,西部地区在生态治理理念、治河技术体系方面还较为滞后^[16]。总体而言,建立库区典型次级河流健康评价指标体系、河流健康状况评价方法学以及生物监测评估模式,是次级河流小流域生态综合整治的重要技术内容。现阶段,应首先构建适合于库区次级河流污染特征和相应水域功能定位的生态评价指标体系,形成现状监测评估基础数据库。

(三)库区次级河流污染治理生态工程技术分析

十余年来,国内外的有关专家和研究人员经过不断探索和研究,运用现代生态学、环境科学、系统工程的基本原理和方法,研发了一系列流域水环境生态修复和生态工程技术。结合库区次级河流域特点和污染特性,从着眼于外源营养物污染控制和资源持续利用的角度,认为水污染生态治理工程是库区次级河流域生态调控修复的较佳选择之一。库区次级河流水体富营养化防治应遵循“水污染治理与生态修复”相结合的技术路线,采用低投资、低运行管理费用和适应性较强的生态工程治理技术,并充分发挥资源的生产潜力。

1. 人工湿地技术

人工湿地法在欧洲又称为根区法,通过模拟自然湿地,人为设计与建造的由基质、植物、微生物和水体组成的复合体,利用生态系统中基质—水生植物—微生物的物理、化学和生物的协同作用,将水中可沉降固体、胶体物质、BOD₅、N、P、重金属、难降解有机物、细菌和病毒等去除,实现对污水的净化和改善,是一种具有较高生产力和较大活性的营养盐控制的生态处理系统^[17-19]。人工湿地的类型主要有水平流碎石床湿地、下行流湿地、上行流湿地等。国内外工程实例资料表明^[20-23],人工湿地耐污及水力负荷强,抗冲击负荷性能好,效果稳定,处理废水能耗省,维护管理简便,具有相当脱氮除磷能力,并能形成多样性的生境。人工湿地技术对于小流量及间歇排放的废水处理以及建设次级河流河口区域生态缓冲带等尤为适宜。但由于人工湿地系统所需要的土地面积相对较大,一般只能用于次级河流域中用地相对不受限制的地方,也可用于流域内城镇污水处理厂尾水的深度处理。

2. 人工生态浮岛或浮床

生态浮岛(浮床)技术是通过人工把水生植物或改良驯化的陆生植物移栽到水面浮岛上,植物在浮岛上生长,并与微生物形成互生协同效应,通过根系吸附并吸收水体中的氮、磷等营养物质,从而达到防治水体富营养化的目的^[24-26]。一些浮岛植物还具有良好的克藻效用,能专性地抑制相应藻类的生长。一个完整的浮岛主要包括三个部分:浮岛载体、浮岛固定装置和浮岛植物^[27]。人工生态浮岛技术是一种非常有效的水体氮磷污染防治技术,在国内外具有许多成功应用的实例^[26,28-29],和其他污水生态治理

技术相比,在工程造价与占地、营养盐去除效果、生物生态多样性、人造景观以及经济效益等方面优势明显,是一种适宜用于库区次级河流水体富营养化防治的一种生态工程技术,尤适用于河流中氮磷浓度高且水流流速平缓的中小河道。但作为一种新兴的水处理生态技术,人工浮岛技术出水水质的可靠性和稳定性还有待进一步提高,尤其在冬季气温较低条件下,植物生长受到抑制而对处理效果产生一定的不利影响。

3. 生态稳定塘

生态稳定塘是一种半人工的生态系统,细菌、浮游动物、藻类等水生植物、高等动物等形成多条食物链,构成稳定塘中各种生物相互依存、相互制约的复杂生态体系,其功能主要是滞留污染径流,循环利用水体中的营养物质,使废水中的污染物质得到分级转化、降解和利用。生态稳定塘进行污水净化的占地面积相对较大,且作为一种半人工的生态系统,人为调节众多环境因子的能力非常有限^[17]。但生态稳定塘建造成本低,操作管理容易,不仅能取得良好的BOD₅去除效果,而且可有效去除氮、磷等营养物质,还原重金属及有毒有机物等。因此,生态稳定塘不仅可以作为库区污水营养盐去除的一种具有竞争优势的生态工程技术,而且也是能够结合水产养殖的一种有效的资源化手段。

4. 生态沟净化技术

生态沟是一种净化农村生活污水的治理系统。一般在其沟底铺鹅卵石,中间铺粗砂,表面铺细沙,细沙上种水浮莲、水芋等根系发达的植物。生态沟技术对营养物质的去除主要通过土壤的浸润毛细作用,吸附、过滤、沉淀作用以及生物降解与土壤中生长的植物摄取作用,实现污水高效治理及营养物质去除的目的。同时,沟中沙石填料构成滤床也可对污水中颗粒杂物进行过滤治理。经生态沟后处理的农村生活污水,还可直接排入农田灌溉,实现污水的资源化利用。生态沟技术污水治理成本很低,从保护农村生态环境和降低入河氮磷污染负荷的角度,很值得在库区广泛推广。

三、结语

结合库区次级河流水体富营养化现状与特性以及过去几十年国际上的污染河流治理经验,从小流域的角度考虑次级河流污染的综合整治,削减流域面源营养污染负荷,恢复河流应有的自然物理生态结构,是库区次级河流富营养化污染防治和恢复河流生态系统功能的最根本措施。充分利用生态系统的自我组织和自我调节能力,因地制宜地优化组合各种生态工程治理技术对受污染水体进行治理,是三峡库区富营养化水体防治的最佳选择之一,对改善库区水环境质量、促进库区次级河流小流域生态系统的良性循环和可持续发展具有重要意义。

参考文献:

- [1]重庆市环境保护局. 2005年,2006年重庆市环境状况公报[R]. 2007.
- [2]尹真真,邓春光,徐静. 三峡水库二期蓄水后次级河流回水河段富营养化调查[J]. 安徽农业科学, 2006, 34

- (19):4998-5000.
- [3] 张晟, 李崇明, 郑丙辉, 等. 三峡库区次级河流营养状态及营养盐输出影响[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 500-505.
- [4] LUO GUYUAN, XU XIAOYI, JI FANGYING, et al. . Water environment pollution in Three - Gorge Reservoir Area and treatment technology [J]. Journal of Chongqing University (English Edition), 2002, 1(6): 32-36.
- [5] 国家环保总局科技标准司编. 中国湖泊富营养化及其防治研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001: 23-28.
- [6] HUDOSN J J, TAYLON W D. SCHINDLER D W. Phosphate concentrations in lakes [J]. Nature, 2000, 406(6): 54-56.
- [7] 李锦秀, 廖文根, 黄真理. 三峡工程对水流水质影响预测[J]. 水利水电技术, 2002, 33(10): 22-25.
- [8] 龚宇, 李永建, 王德蕊, 等. 三峡水库135m水位蓄水典型次级河流回水段富营养化监测评价[J]. 中国环境监测, 2005, 21(4): 87-89.
- [9] HANS W. Assessing and managing nutrient - enhanced eutrophication in estuarine and coastal waters: Interactive effects of human and climatic perturbations [J]. Ecological Engineering, 2006, 26(1): 40-54.
- [10] 宋庆辉, 杨志锋. 对中国城市河流综合管理的思考[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 377-382.
- [11] 沈耀良. 废水生物处理新技术理论与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.
- [12] 秦伯强. 富营养化湖泊开敞水域水质净化的生态工程试验研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(1): 1-4.
- [13] KARR J K. Assessments of biotic integrity using fish communities[J]. Fisheries(Bethesda), 1981(6): 21-27.
- [14] HART B T, DAVIES P E, HUMPHREY C L, et al. . Application of the Australian river bioassessment system(AUSRIVAS) in the Brantas River East Java [J]. Indonesia Journal of Environmental Management, 2001, 62: 93-100.
- [15] PARSONS M, THOMS M, NORRIS R. Australian River Assessment System: Review of Physical River Assessment Methods - A Biological Perspective, Monitoring River Health Initiative Technical Report no 21 [Z]. Canberra: Commonwealth of Australia and University of Canberra, 2002: 1-24.
- [16] 胡洪营, 何苗, 朱铭建, 等. 污染河流水质净化与生态修复技术及其集成化策略[J]. 给水排水, 2005, 31(4): 1-9.
- [17] 罗固源. 水污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [18] HAMMERDA. Constructed wetlands for wastewater treatment[M]. Michigan: Lewis Punbilisher Inc. , 1989: 5-20.
- [19] SHACKLEVJ, FREEMANC, REYNOLDSB. Carbon supply and the regulation of enzyme activity in constructed wetlands[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32: 1935-1940.
- [20] VOLKER L, ELKE E, MARTINA L, et al. . Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2001, 18: 157-171.
- [21] 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]. Water Science Technology, 1997, 35(5): 97-204.
- [22] 谢爱军, 周炜, 年跃刚, 等. 人工湿地技术及其在富营养化湖泊污染控制中的应用[J]. 净水技术, 2005, 24(5): 49-52.
- [23] 李艳红, 解庆林, 白少元, 等. 利用人工湿地系统深度处理城市污水尾水[J]. 环境工程, 2006(3): 86-90.
- [24] NAKAMURA K, SIMATANI Y. Water Purification and Environmental Enhancement by the Floating Wetland [C]. Proc of 6th IAWQ Asia - Pacific Regional Conference in Korea, 1997: 46-61.
- [25] 吴伟明, 宋祥甫, 金千瑜, 等. 鱼塘水面无土栽培美人蕉研究[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(3): 206-210.
- [26] 宋祥甫, 邹国燕, 吴伟明, 等. 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.
- [27] 陈荷生. 太湖生态修复治理工程[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(2): 173-178.
- [28] 施丽丽, 叶存奇, 等. 黄花水龙作为人工浮岛植物的开发研究[J]. 生物学通报, 2005, 40(8): 15-17.
- [29] 丁则平. 日本湿地净化技术人工浮岛介绍[J]. 海河水利, 2007(2): 63-65.

Discussion on the Eutrophication and Ecological Engineering Technologies for Secondary Rivers in the Three-Gorge Reservoir

XIAO Tie-yan, XU Xiao-yi, FU Yong-chuan, LUO Gu-yuan

(College of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: At present, the water storage level in the Three-Gorge Reservoir (TGR) has reached 165 meters. The TGR has changed into a semi-closed water body with slowing flow, and self-purification ability of water TGR dropped accordingly. The water quality of secondary river becomes one of the direct effects for ecological security in TGR. Based on the analysis of status of eutrophication and happening conditions of secondary river in TGR, ecological engineering technologies for water treatment are discussed in the paper combined with the ecological concepts and routes in the field of river basins at home and abroad.

Key words: Three-Gorge reservoir; secondary river; eutrophication; ecological engineering

(责任编辑 傅旭东)