

# 三峡库区长江干流和支流富营养化研究

胡正峰<sup>1</sup>, 张磊<sup>1\*</sup>, 邱勤<sup>1</sup>, 韩光<sup>1</sup>, 李兴琼<sup>2</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716 2 重庆市云阳县环保局, 重庆 404500)

**摘要:** 长江上游重庆段人口密集, 由于历史的原因, 环境方面基础设施落后, 大量未经处理的工业废水、城市生活污水、船舶污染物和大面积的农田地表径流汇入长江及次级河流。特别是三峡大坝建成蓄水之后, 主河道和支流水体流动明显变缓, 加之长距离回水, 部分次级河流自 2003 年起明显富营养化, 并有逐渐加重的趋势。本文综合了 2002~2009 年对长江三峡水库入库河流营养状态的研究, 得出了次级河流水体综合营养状态的评价, 并结合三峡库区现有污水和垃圾处理设施处理能力与实际排放量的分析, 对于库区支流富营养化趋势进行预测。最后, 通过总结国内外已提出的许多行之有效的富营养化防治措施, 对三峡库区的富营养化防治提出一些建议。

**关键词:** 三峡水库; 次级河流; 富营养化; 防治措施

**中图分类号:** X524 **文献标识号:** A **文章编号:** 1001-4942(2009)12-0074-07

## Study of Eutrophication in Main Stream and Tributaries of Yangtze River in the Three Gorges Reservoir Area

HU Zheng-feng, ZHANG Lei\*, QIU Qin, HAN Guang, LIXing-qiong

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China

2. Environmental Protection Agency, Yunyang County, Chongqing 404500, China)

**Abstract** The upper reaches of the Yangtze River in Chongqing is densely populated. Due to some historical reasons, the environmental infrastructure there is backward. Huge quantities of untreated industrial wastewater, sewage from cities, shipping pollutants and surface runoff of large areas of farmlands are poured into the Yangtze River and its sub-rivers. In particular after the completion and storage of the Three Gorges Dam, the flow velocity of the main channel as well as the tributaries obviously slows down in addition to the long-distance backwater, so the eutrophication has arisen in certain sub-rivers since the year 2003 and has a tendency to worsen. In this paper, the nutritional status of the inflow rivers of the Three Gorges Reservoir were integratedly studied and a comprehensive assessment of the nutritional status of the branch rivers was obtained. Finally, some suggestions were made for preventing and controlling the eutrophication in the Three Gorges Reservoir Area by summarizing some effective measures of the prevention and control of eutrophication at home and abroad.

**Key words** The Three Gorges Reservoir; Sub-rivers; Eutrophication; Prevention and control measures

富营养化问题是当今世界面临的最主要的水污染问题之一。纵观全球, 几乎所有湖泊都存在大大小小的富营养化问题<sup>[1]</sup>。江河流域的富营养化一般不如湖泊、水库等非流动型水体中严重,

但也出了问题。阿斯旺大坝建成后的尼罗河、英国泰晤士河<sup>[2]</sup>等都出现了不同程度的水体富营养化问题。举世瞩目的长江三峡工程完全建成后, 库区长 660 km 以上的干流将变成人工水库, 流速

收稿日期: 2009-09-22

基金项目: 国务院三峡工程建设委员会办公室重点科技项目 (项目编号: KY-01-02-01)

作者简介: 胡正峰 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事环境工程微生物方面研究。E-mail: huzhengfeng2003@163.com

\*通讯作者, echozhangle@yahoo.com.cn

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大大减缓,水环境将由典型的河流水体转变为类似湖泊缓流水体,水的更新周期将大大延长,各支流的河水流速也将减慢,进而将导致水中物质的扩散作用减弱、溶解氧减少,形成新的缓流水体水生生态系统,水体的自净能力将大大降低<sup>[3]</sup>。目前,三峡库区富营养化水质污染现象已显现。如果不采取有效措施,污染问题将更加突出<sup>[4]</sup>。

三峡水库的水环境保护一直是国内外极其关注的重大问题,富营养化现象不仅会给库区社会、经济和环境的可持续发展造成严重影响,并将最终影响到三峡工程预期各项服务目标的实现,因此是一个极其重要的环境问题。目前,针对某一条或几条特定支流库湾富营养化的研究较多,但对较大尺度上支流库湾富营养化的研究报道不多<sup>[5]</sup>。

鉴于此,本文作者对见诸媒体的有关三峡水库库区以及主要次级支流富营养化现状的资料进行了收集和整理,结合该区域现有水资源保护设施的水处理能力,对主要支流库湾的水体富营养化程度进行了评价和初步分析,并探讨了国内外控制和减缓富营养化的一些措施,以期为保障三峡水库水质安全及水环境管理提供理论依据。

## 1 三峡库区总体概况

三峡水利枢纽工程位于长江三峡之一西陵峡中段的三斗坪镇,距下游已建成的葛洲坝水利枢纽工程约 40 km,其设计坝顶高程为海拔 185 m,最终正常蓄水位海拔 175 m,总库容  $393 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,回水长度 660 km,回水末端抵达重庆主城区,涉及湖北省及重庆市的 25 个区县。三峡水利工程于 1997 年正式开始建设,预计 2009 年完工<sup>[6]</sup>。三峡大坝采取分期蓄水,1997 年 11 月 8 日大江截流后,水位提高到海拔 75 m,2003 和 2006 年库区水位分别提高到海拔 139 m 和 156 m。2008 年试验性蓄水任务已经于 11 月 4 日完成,三峡工程坝前水位已达到海拔高程 172.3 m。2009 年整个三峡工程竣工后,水位提高到 175 m<sup>[7]</sup>。三峡库区总面积约为  $6 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中山地占 67.8%,丘陵占 29.5%,平地占 0.9%,每年  $> 10 \text{ mm}$  雨量的降雨日数约 30 次。该区绝大多数是坡耕地,占耕地的 74.3%, $> 25^\circ$  的坡耕地超过 25%<sup>[8]</sup>。耕地面积  $1.060 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,人均耕地面积 440  $\text{m}^2$ ,仅

为全国平均水平的 57%。三峡库区及其上游区人口 1.54 亿,其中农业人口超过 60%。国内生产总值约为 5 300 亿元,人均国民生产总值仅 3 441 元/人,远远低于全国平均水平。

## 2 三峡库区水体富营养化现状

三峡水库蓄水以后,水流运动速度迅速减缓,加上天然状况下库区江段总磷总氮浓度一直偏高<sup>[9]</sup>,故库区水域是否会发生富营养化,是三峡水库水污染综合防治过程中急需开展研究的重要课题。

### 2.1 三峡库区干流营养状态

重庆市环境科学研究院对三峡水库成库后的 7 次监测结果显示,截流后营养盐浓度、总氮、总磷在各断面均有所增高<sup>[10]</sup>。从长江三峡库区江段及主要支流水质现状来看,库区干流断面平均总磷浓度达 0.15~0.25  $\text{mg/L}$ ,总氮浓度在 1.5~2.8  $\text{mg/L}$  之间<sup>[9]</sup>,已经远远超过目前国际上公认的当水体中总磷和总氮的浓度分别达到 0.02  $\text{mg/L}$  和 0.2  $\text{mg/L}$  时,从营养盐因子考虑,有可能发生藻类疯长的“水华”现象的水体富营养化初始浓度的限制<sup>[11]</sup>。目前为止之所以没有出现明显的水体富营养化现象,主要是其仍然存在的天然河道特性,水体的对流扩散和自净能力仍在一定程度上发挥作用<sup>[12]</sup>;此外,长江的泥沙含量大,水体透明度较低,泥沙对污染物质的吸附也是河流的自净能力之一<sup>[13-14]</sup>。因此,长江干流在天然情况下,总磷、总氮超标只会影响到局部水域如两岸消落带的水域功能<sup>[15]</sup>,一般不会发生富营养化。

### 2.2 三峡库区蓄水后支流库湾营养状态

#### 2.2.1 三峡水库蓄水后部分次级支流富营养化问题的出现

三峡水库蓄水后,整体水质较好,基本达到了 II 类水域水质标准<sup>[16]</sup>。但三峡成库以后的大小河湾不计其数,特别是在枯水期,次级河流河口由于水量较少,受长江的顶托,形成回水,流速明显降低,泥沙沉降,水体透明度增加,有利于水中藻类的光合作用。近年来的调查研究表明,三峡库区的一些次级河流,如乌江<sup>[17]</sup>、神女溪<sup>[18]</sup>、大溪河<sup>[19]</sup>和大宁河部分河段<sup>[20]</sup>、云阳县的澎溪河部分河段<sup>[20]</sup>、万州区的瀘渡河部分河段<sup>[21]</sup>、香溪

河<sup>[22]</sup>以及嘉陵江局部河段<sup>[23]</sup>都出现了不同程度的富营养化现象。其原因主要有以下几个方面:

(1)从流速上来看,库区 156 m 蓄水后次级支流的水流流速基本上是小 于 0.1 m/s, 回水段水流停留时间加长, 污染物扩散降解速度减缓, 营养盐的富集给藻类生长提供了养料, 而缓慢流动的水体也有利于藻类的生长与聚集。另外, 流速减缓使水体中的泥沙大量沉积, 水色变清, 减少了太阳光能的损失, 给藻类生长提供了能源。

(2)库区次级支流的热量条件也有利于发生富营养化。6~9月是库区的夏季, 库区水体温度与平均气温接近, 适合藻类繁殖生长(15~30℃)。6~9月日照时数是全年最多的, 达到 700 h以上, 占全年日照时间总数的 45%以上, 太阳的总辐射量平均为 44.64 kJ/m<sup>2</sup>, 比冬季高 24.71 kJ/m<sup>2</sup>, 充足的阳光加快了藻类的光合作用速度, 促使藻类的生长繁殖。

(3)随着库区城市化进程的加快, 库区营养盐负荷将会增加。可以初步判定: 在不采取一定防治措施的情况下, 三峡库区主要次级支流 135 m 156 m 175 m 回水区水流、日照、营养盐负荷条件只会更加有利于水体中浮游藻类的生长和繁殖, 水体发生富营养化趋势将会日益加重。

## 2.2.2 三峡库区部分次级支流回水河段富营养化调查

三峡水库的格局已经基本定型, “三峡库区”的概念应当作适当调整。原则上可划分为三个区段: ①库首段范围包括三峡工程水库(坝)区的湖北省的宜昌县、兴山县、秭归县、巴东县和宜昌市区, 面积  $1.18 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, 占库区面积的 20.8%, 人口 214.39万人, 占库区人口的 14.625%; ②库腹段范围包括重庆市所辖的巫山县、巫溪县、奉节县、云阳县、开县、涪陵区、万州区、忠县、石柱县、丰都县, 面积  $3.9 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, 占库区面积的 68.7%, 人口 982.16万人, 占库区人口的 67%; ③库尾段范围包括重庆市区(包括渝中区、沙坪坝区、南岸区、九龙坡区、大渡口区、江北区和北碚区)和所辖的长寿区、江津区、巴南区, 面积 9 100 km<sup>2</sup>, 占库区面积的 12.2%, 人口 764.19万人, 占库区人口的 18.375%。

多年来, 政府和相关研究单位都在密切地关注着三峡库区的污染情况。现将库区主要支流藻

类爆发的现状、原因及预测的研究总结如下:

(1)李崇明等(2004)<sup>[24]</sup>根据三峡库区江段 16条一级支流及重庆市 35座大中型水库的调查资料, 分析认为三峡库区江段大部分支流已经出现富营养化状况, 局部水域爆发“水华”的可能性很大。

(2)张晟等<sup>[25]</sup>于 2002~2003 年分别对库区 15条次级河流进行采样分析, 结果显示: 次级河流受到不同程度的污染, 水体中氮含量丰富, 部分次级河流富营养化的限制因子为磷。

(3)张晟等(2003)<sup>[17]</sup>根据对乌江连续监测, 认为水温较低月份(如 2月)也能导致富营养化的发生, 且水流流态可能是影响三峡库区水体富营养化的条件之一。

(4)郭平等<sup>[26]</sup>于 2004年 3月对三峡库区蓄水后 3条典型次级河流回水河段富营养化进行监测与评价, 认为次级河流回水河段越长、末端来水量越大, 对藻类生长聚集越不利, 反之亦然。

(5)蒙万轮等<sup>[27]</sup>于 2004年 4月分别对三峡库区 3条一级支流回水段水体进行了富营养化调查和监测, 并运用综合营养状态指数法(Trophic State Index method TSM)法<sup>[28,29]</sup>对监测结果进行了评价和分析, 认为库区支流回水段的营养盐浓度并不比长江干流高, 但库区支流回水段的中下游区域已经发生了富营养化现象。藻类的大量繁殖是由于水文条件改变等因素的综合影响而导致的。

(6)邓春光等<sup>[30]</sup>于 2004年通过对三峡库区 3条典型支流富营养化进行预测, 建立富营养化类比分析预测模型, 并用此模型对其它 32条次级支流在 2010年三峡水库蓄水运行期间的富营养化的潜势进行了预测。结果发现部分次级河流发生藻类水华爆发的可能性肯定是存在的; 发生时间主要集中在 4~9月春夏之交、夏季及夏秋之交; 并且越靠近坝首, 富营养化越呈现加重趋势。

(7)周广杰等<sup>[31]</sup>于 2005年比较了库区 4条支流春、秋两季浮游藻类优势种、细胞密度和生物量等指标, 对支流“水华”成因进行了初步分析, 认为库区的水华属于季节性水华, 可通过控制外源污染和增加水体流速来控制。

同年, 蔡庆华等<sup>[32]</sup>对三峡水库 22条入库支流库湾的营养状态进行综合评价, 结果表明中营

养支流库湾有 5 条 (占 22.7%), 富营养支流库湾有 17 条 (占 77.3%), 其中重度富营养化支流库湾有 10 条 (占 45.5%); 但三峡水库干流水质尚好, 仍保持中营养状态。

(8)王敏等<sup>[18]</sup>于 2006 年 3 月对爆发大规模水华的库区一级支流神女溪进行现场监测和调查, 并结合当地水文、气象、污染源调查等资料进行综合分析, 认为神女溪此次“水华”是水文和气象等条件综合导致的。周贤杰等<sup>[34]</sup>于 2006 年 4 月从三峡库区典型次级河流梅溪河采集水样, 在室内选用  $I_9(3^4)$  正交表进行藻类培养试验, 以  $Chl$  最大浓度作为指标选择适合藻类生长的适宜条件, 结果得到各因素对藻类生长影响重要程度顺序为水温 > 活性磷酸盐浓度 > 光照强度 > 溶解无机氮浓度。同年, 幸治国等<sup>[35]</sup>通过对库区 11 条受三峡库区影响的次级河流回水段的富营养化监测数据的相关分析, 认为库区次级河流回水段富营养化的实质仍是一个水污染问题。除与水流变缓、水色变清等自然环境变化有关外, 河流沿岸的排污、自然生态的破坏、农田水土流失等是其重要原因。由于次级河流的富营养化是由多因素共同作用的结果, 因此防御起来相对较难。

(9)黄钰玲<sup>[36]</sup>于 2006~2007 年间对三峡水库支流香溪河库湾环境现状进行调查及富营养化评价, 认为其整体水质已达到重富营养化状态; 香溪河库湾蓄水前后环境条件如气温、光照等变化不大; 库湾暴发“水华”, 除水体水质达重富营养化条件外, 另一主要因素应是库湾水动力条件(如流速)的改变。

通过综合 2002~2007 年间对三峡库区 32 条主要入库河流营养状态的研究<sup>[17, 24~36]</sup>, 可以得出对各次级河流水体综合营养状态的评价(见表 1)。库首段有 6 条河流, 水体富营养化程度为重度的有 4 条, 占全部统计河流的 12.5%; 中一重度富营养化河流有 2 条, 占全部统计河流的 6.25%。库腹段有 20 条河流, 水体富营养化程度为重度的有 4 条, 占全部统计河流的 12.5%; 中一重度富营养化河流有 6 条, 占全部统计河流的 18.75%; 中度富营养化河流有 8 条, 占全部统计河流的 25%; 轻一中度富营养化河流有 2 条, 占全部统计河流的 6.25%。库尾段有 6 条河流,

均为中度富营养化河流, 占全部统计河流的 18.75%。

表 1 三峡库区次级河流水体综合营养状态评价

| 编号 | 河流名称 | 流域面积 (km <sup>2</sup> ) | 入长江口位置 | 距三峡大坝距离 (km) | 综合营养状态级别 |
|----|------|-------------------------|--------|--------------|----------|
| 1  | 綦江   | 4394.0                  | 顺江     | 654.0        | 中度富营养    |
| 2  | 龙滩河  | 195.0                   | 巴南城区   | 633.0        | 中度富营养    |
| 3  | 花溪河  | 271.8                   | 李家沱    | 620.0        | 中度富营养    |
| 4  | 嘉陵江  | 157900.0                | 朝天门    | 604.0        | 中度富营养    |
| 5  | 桃花溪  | 363.8                   | 长寿河街   | 528.5        | 中度富营养    |
| 6  | 梨香溪  | 850.6                   | 羊角堡    | 519.0        | 中度富营养    |
| 7  | 龙塘河  | 433.5                   | 蔺市镇    | 506.2        | 中度富营养    |
| 8  | 乌江   | 87920.0                 | 麻柳咀    | 484.0        | 中度富营养    |
| 9  | 渠溪河  | 1458.0                  | 珍溪镇    | 453.5        | 中度富营养    |
| 10 | 龙河   | 2810.0                  | 乌杨     | 429.0        | 中度富营养    |
| 11 | 东溪河  | 426.0                   | 忠县城区   | 385.0        | 重度富营养    |
| 12 | 黄金河  | 958.0                   | 红星     | 361.0        | 重度富营养    |
| 13 | 汝溪河  | 720.0                   | 石宝镇    | 337.5        | 中度富营养    |
| 14 | 瀘渡河  | 269.0                   | 瀘渡     | 303.2        | 中度富营养    |
| 15 | 芭溪河  | 228.6                   | 万州城区   | 227.0        | 重度富营养    |
| 16 | 澎溪河  | 5172.5                  | 双江     | 247.0        | 中一重度富营养  |
| 17 | 汤溪河  | 1810.0                  | 云阳县    | 222.0        | 中一重度富营养  |
| 18 | 磨刀河  | 3197.0                  | 兴和     | 218.8        | 中一重度富营养  |
| 19 | 长滩溪  | 1767.0                  | 故陵     | 206.8        | 中一重度富营养  |
| 20 | 朱衣河  | 153.6                   | 朱衣镇    | 186.0        | 轻一中度富营养  |
| 21 | 梅溪河  | 1972.0                  | 奉节     | 158.0        | 中度富营养    |
| 22 | 草堂河  | 394.8                   | 白帝城    | 153.5        | 轻一中度富营养  |
| 23 | 大溪河  | 158.9                   | 大溪     | 146.0        | 中一重度富营养  |
| 24 | 大宁河  | 4200.0                  | 巫山     | 123.0        | 中一重度富营养  |
| 25 | 神女溪  | 315.0                   | 官渡口    | 118.0        | 重度富营养    |
| 26 | 抱龙河  | 325.0                   | 埠头     | 106.5        | 中度富营养    |
| 27 | 沿渡河  | 1031.5                  | 西瀘口    | 73.5         | 重度富营养    |
| 28 | 青干河  | 523.0                   | 沙镇溪    | 48.0         | 中一重度富营养  |
| 29 | 袁水河  | 711.0                   | 茅坪镇    | 45.5         | 重度富营养    |
| 30 | 童庄河  | 248.0                   | 邓家坝    | 42.0         | 重度富营养    |
| 31 | 香溪河  | 3095.0                  | 归州镇    | 32.0         | 重度富营养    |
| 32 | 九畹溪  | 514.0                   | 九畹溪    | 20.0         | 中一重度富营养  |

综上所述, 库首和库腹段的河流富营养化程度相对比较高。三峡水库 II 期蓄水前后, 尽管成库河段的主要次级河流的常规水质整体维持稳定, 但富营养化专项监测的结果表明, 几条典型的次级河流的部分河段成库后藻类活动旺盛<sup>[37]</sup>, 营养状态异常, 说明由于支流库湾区流速减缓, 蓄水对水体富营养化已经有明显影响。三峡库区支流“水华”属于季节性“水华”, 各次级河流总体营养级别有逐年加重的趋势。因此三峡水库蓄水 175 m 后, 将进一步增加部分区域水体特别是三峡水库支流库湾区发生富营养化的风险。

### 3 三峡库区现有污水和垃圾处理设施及水体富营养化发展趋势预测

长江三峡库区地处我国西部地区,区域经济和社会发展水平还不高,长期以来库区废水和垃圾处理率低。三峡库区的污染负荷大,是三峡水库水体富营养化的根源。

#### 3.1 库区工业废水、城镇生活污水排放与处理状况统计

据统计<sup>[38]</sup>,三峡库区工业污染源废水和城镇污水处理工程共 94 处,处理规模总量每年为  $2.89 \times 10^8$  t。其中湖北库区废污水处理工程有 7 处,处理规模总量每年为  $0.18 \times 10^8$  t;重庆库区共计 87 处,处理规模总量每年为  $2.71 \times 10^8$  t。

根据中华人民共和国环境保护部 2008 年“长江三峡工程生态与环境监测公报”中环境统计结果显示:2007 年三峡库区工业污染源废水和城镇生活污水排放总量为  $9.52 \times 10^8$  t,其中重庆库区为  $9.21 \times 10^8$  t,湖北库区为  $0.31 \times 10^8$  t,分别占 96.74% 和 3.26%。三峡库区工业废水、城镇生活污水排放量超过可处理总量  $6.63 \times 10^8$  t,污水处理率为 31.24%。

#### 3.2 库区生活垃圾状况统计

据统计<sup>[38]</sup>,三峡库区城镇垃圾处理工程共 84 处,处理规模总量为  $152.86 \times 10^4$  t/年。其中湖北库区垃圾处理工程有 11 处,处理规模总量为  $13.62 \times 10^4$  t/年;重庆库区垃圾处理工程有 73 处,处理规模总量为  $139.24 \times 10^4$  t/年。

根据中华人民共和国环境保护部 2008 年“长江三峡工程生态与环境监测公报”中环境统计结果显示:2007 年库区城镇共产生生活垃圾  $227.80 \times 10^4$  t,超过可处理总量  $74.94 \times 10^4$  t,垃圾处理率为 67.10%。

可以预计,随着人口、经济和社会的发展,三峡库区环境污染将呈逐年加剧之势,三峡库区环境污染治理任务任重道远。就笔者实地观察,大量农田的淹没也是“水华”形成的不可忽视的重要原因。三峡二期工程成库后,形成了库容约为  $123 \times 10^8$  m<sup>3</sup> 巨大水库,水文、水力条件介于河流与湖泊之间,一般流速比河流小比湖泊大,换水周期因人为需要而改变<sup>[39]</sup>。在水体营养物质浓度不变的条件下,当天然河流变成水库后,水流条件

的变化有可能会 导致水体富营养化的极端表征——“水华”的发生。三峡库区江段有流域面积大于 100 km<sup>2</sup> 的支流约 40 条,大小河湾不计其数。受成库后干流雍水的影响,这些支流的河口和库湾将形成持续时间不等的缓流区甚至死水区。加之库区冬季气温升高、雾日减少、日照增长<sup>[40]</sup>等,为藻类的生长繁殖提供了有利条件,更增加了在上述区域爆发“水华”的可能性。三峡二期蓄水完成后,在大宁河、香溪河、神女溪、蓬溪河等支流河口都出现的不同程度的“水华”现象,说明三峡库区的富营养化控制和藻类“水华”防治等问题已经迫在眉睫<sup>[24]</sup>。

### 4 三峡库区富营养化防治措施及深化研究建议

悬挂在联合国大厅的世界地图上,仅仅标出了中国 4 个城市的名字,其中一个就是重庆。重庆市常住人口 3 235.32 万人,分别达到北京市和上海市的 1.96 倍和 1.71 倍,是中国境内以人口计最大城市。而在特大型城市下游建设特大型水库,在世界水利史上还没有先例。为了确保三峡库区水环境质量的安全,必须在大规模削减现有污染的基础上,合理控制人口规模,严格控制不合理的开发活动,禁止新建污染严重的企业,加大污染防治和工业结构调整力度,以改善水质和保护生态环境。

参照国内外许多行之有效的富营养化防治措施,笔者认为针对长江三峡库区的水体污染问题,目前亟需做到以下几点:

#### 4.1 强化污染预防意识

美国、法国、加拿大等已经制定多种污染综合预防措施并推行多年,但在我国目前整体上还没有充分认识预防的极端重要性,实施可持续发展的措施偏少、奖惩力度小,清洁生产、生态农业、绿色服务、废物资源化进展缓慢,污染治理技术、投融资体制和管理理念还需创新。因此,必须通过行政、教育等手段转变观念,强化民众的水体富营养化预防意识,科学制定、严格执行预防措施,尽量从源头上消减污染负荷,才能提高治理效率。

#### 4.2 全面调查

针对三峡水库富营养化等问题的研究,国内外有不少工作已经完成或正在开展,并取得了许

多阶段性成果,但总体而言,尚不能全面把握水华暴发的时间、地点、程度、范围等。因此有必要结合三峡工程建设规划,适时开展有针对性的全面调查,积累资料,为政府决策提供依据。

#### 4.3 机理研究

20 世纪 60、70 年代以来,国际上开展了大量的有关水体富营养化研究。但由于水域生态系统的复杂性,也由于形成原因和影响的复杂性,特别在人类活动严重干扰下,作为自然和人为因素叠加的过程,水体富营养化仍然是一个因环境受损而引起的资源、环境、生态和社会发展的世界性问题。富营养化过程、水华暴发机理等仍是因时因地而异。因此有必要在三峡水库典型入库支流库湾(如香溪河、大宁河、澎溪河等),从气象、水文、物理、化学、生物、数学、地理等多学科综合的角度研究三峡水库富营养化的形成机理和调控对策。

#### 4.4 生态调度

目前,国内水库调度实际操作中考虑的主要因素仍然集中在防洪、发电、航运等方面,水坝对河流生态系统的影响还没有受到更多地关注。而在发达国家,河流生态系统与环境需水量、鱼类与野生动物保护都是大型水库调度过程中重点考虑的问题。随着人们对生态环境保护的日益重视,水库调度也应该从过去的调度规程基础上进行扩展,实行多目标调度。

水库富营养化的主要影响因素可分为营养因子(氮、磷等)、环境因子(水温、光照、透明度等)和水文因子三类。研究表明,水库的面积、容积、水深、岸线系数、入库径流补给系数、换水周期和水位变幅、出库径流、流速等与富营养化关系密切<sup>[41]</sup>。因此有必要进一步加强水文、气象等过程对藻类及其它水生生物时空格局影响的研究,在构建水库流场模型的基础上,叠加生态因子场<sup>[42]</sup>,针对三峡水库及主要库湾在不同时段的水文、水生态特点,结合防洪、发电、下游航道管理、水库水环境保护,合理进行基于生态系统管理的水库生态调度<sup>[33]</sup>,可能是控制或减缓三峡水库水华暴发的一种有效手段。

#### 4.5 加强生态环境保护

加强三峡库区及其上游的生态环境保护,是确保三峡库区水环境安全的重要任务。生态环境保护的重点是控制三峡库区上游的水土流失,减

少入库的泥沙量。在优先实施国家天然林保护工程、退耕还林还草工程及水土保持工程的基础上,库区内 25°以上的坡耕地应全部还林还草;建立岸边生态保护带,严禁在该区域内进行任何有碍生态保护的活动。上游区以封山育林育草为主,并在水土流失比较严重的区域建立岸边生态保护带,严格控制该区域内破坏生态环境的活动。通过建立自然保护区、生态示范区、生态功能保护区和重点资源开发监管区,采用适当的工程措施,使三峡库区及其上游水土流失区域得到强制性保护,尽快恢复原有的生态环境。

#### 参 考 文 献:

- [1] 李小平. 美国湖泊富营养化的研究和治理[J]. 自然杂志, 2002 24(2): 63—68.
- [2] 联合国环境规划署. 水体富营养化(续)[J]. 世界环境, 1994 2: 15—18.
- [3] 黄秀山. 三峡库区水污染及其治理政策[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002 25(6): 155—158.
- [4] 吕怡兵, 宫正宇, 连 军, 等. 长江三峡库区蓄水后水质状况分析[J]. 环境科学研究, 2007 20(1): 2—6.
- [5] 胡建林, 刘国祥, 蔡庆华, 等. 三峡库区重庆段主要支流春季浮游植物调查[J]. 水生生物学报, 2006 30(1): 116—119.
- [6] Hofer M V, Jones J R. Factors affecting the relation between phosphorus and chlorophyll a in Midwestern reservoirs[J]. Can. J. Fish Aquat Sci., 1983 40: 192—199.
- [7] 周双超. 三峡三期工程综述[J]. 中国三峡建设, 2004 4: 13—24.
- [8] 顾丁锡, 舒金华. 湖泊水污染预测及其防治规划方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988 15—16.
- [9] 张 晟, 李崇明. 三峡库区富营养化评价方法探讨[J]. 西南农业大学学报, 2004 26(3): 340—343.
- [10] 张 晟, 刘景红, 张全宁, 等. 三峡水库成库初期水体中氮、磷分布特征[J]. 水土保持学报, 2005 19(4): 123—126.
- [11] 黄玉瑶. 内陆水域污染生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2001 37.
- [12] 陆志耕. 加拿大环境保护考察概述[J]. 新疆环境保护, 1998 9: 67—69.
- [13] 刘永明, 贾绍凤, 蒋良维, 等. 三峡水库重庆段一级支流回水河段富营养化潜势研究[J]. 地理研究, 2003 23(1): 67—72.
- [14] 戴润泉, 臧小平, 邱光胜. 三峡水库蓄水前库区水质状况研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004 13(2): 124—127.
- [15] 周 彬, 朱晓强, 杨达源. 长江三峡水库库岸消落带地质灾害防治研究[J]. 中国水土保持, 2007 11: 43—45.
- [16] 杨 玲, 徐 刚. 三峡库区水环境评价[J]. 河北农业科

- 学, 2008 12(7): 105—106 156.
- [ 17] 张 晟, 李崇明, 王毓丹, 等. 乌江水污染调查[ J]. 中国环境监测, 2003 19(1): 23—26.
- [ 18] 王 敏, 张建辉, 吴应辉, 等. 三峡库区神女溪水华成因初探[ J]. 中国环境监测, 2008 24(1): 60—63.
- [ 19] 周广杰, 况琪军, 刘国祥, 等. 三峡库区藻类水华调查及毒理学研究[ J]. 水生生物学报, 2006 30(1): 37—41.
- [ 20] 张 晟, 李崇明, 郑 坚, 等. 三峡水库支流回水区营养状态季节变化[ J]. 环境科学, 2009 30(1): 64—69.
- [ 21] 郑丙辉, 张 远, 刘鸿亮, 等. 三峡水库营养状态评价标准研究[ J]. 环境科学学报, 2006 26(6): 1022—1030.
- [ 22] 雒文生, 谈 戈. 三峡水库香溪河库湾水质预测[ J]. 水电能源科学, 2000 18(4): 46—48.
- [ 23] 白薇扬, 王 娟, 王英魁, 等. 嘉陵江重庆段水体富营养化现状分析[ J]. 重庆工学院学报, 2008 22(11): 66—69.
- [ 24] 李崇明, 黄真理, 张 晟, 等. 三峡水库藻类“水华”预测[ J]. 长江流域资源与环境, 2007 16(1): 1—6.
- [ 25] 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.
- [ 26] 郭 平, 龚 宇, 李永建, 等. 三峡库区 135m 水位蓄水典型次级河流回水区富营养化监测评价[ J]. 中国环境监测, 2005 21(2): 88—89.
- [ 27] 蒙万轮, 钟成华, 邓春光, 等. 三峡库区蓄水后支流回水区富营养化研究[ J]. 云南环境科学, 2005 24(1): 93—95.
- [ 28] Carlson R E. A trophic state index for lakes[ J]. Limnology and Oceanography 1977 22(2): 361—369.
- [ 29] Aizaki M. Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lakes and its relationships to other parameters related to trophic state[ J]. Research Report of National Institute of Environmental Study 1981, 2(3): 13—31.
- [ 30] 邓春光, 龚 玲. 三峡库区富营养化发展趋势研究[ J]. 农业环境科学学报, 2007 26(增刊): 279—282.
- [ 31] 周广杰, 况琪军, 胡征宇, 等. 三峡库区四条支流藻类多样性评价及“水华”防治[ J]. 中国环境科学, 2006 26(3): 337—341.
- [ 32] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究[ J]. 水生生物学报, 2006 30(1): 7—11.
- [ 33] 唐 涛, 渠晓东, 蔡庆华, 等. 河流生态系统管理研究. 以香溪河为例[ J]. 长江流域资源与环境, 2004 13(6): 594—598.
- [ 34] 周贤杰, 罗固源, 杨清玲, 等. 三峡库区次级河流回水区环境因子对藻类生长影响的模拟实验研究[ J]. 环境科学学报, 2008 28(3): 558—562.
- [ 35] 幸治国, 邓春光, 钟成华, 等. 三峡库区典型支流河口回水区富营养化发生条件与预防措施[ R]. 研究报告, 2006.
- [ 36] 黄钰玲. 三峡水库香溪河库湾水华生态机理研究[ D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2007. 142—144.
- [ 37] 李永建, 李斗果, 王德蕊. 三峡工程 II 期蓄水对支流富营养化的影响[ J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005 4(27): 474—478.
- [ 38] 国家环境保护总局. 长江三峡工程生态与环境监测公报[ R]. 北京: 国家环境保护总局, 2008. 23—30.
- [ 39] 金相灿. 中国湖泊富营养化[ M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 116—118.
- [ 40] 李 黄. 长江三峡工程生态与环境监测系统局地气候监测评价研究[ M]. 北京: 气象出版社, 2003. 25—31.
- [ 41] Wagner M. Effect of hydrological patterns of tributaries on biotic processes in a lowland reservoir consequences for restoration[ J]. Ecological Engineering 2000 16: 79—90.
- [ 42] Zhao B, Cai Q. Geostatistical analysis of chlorophyll a in fresh-water ecosystems[ J]. Journal of Freshwater Ecology 2004 19(4): 613—621.