

· 解析评价 ·

doi: 10.3969/j.issn.1674-6732.2013.10.011

富营养化水库水生生态环境长期观测研究

庄一廷¹, 翁笑艳², 李 耕²

(1. 福建省环境监测中心站, 福建 福州 350001; 2. 福州市环境监测站, 福建 福州 350005)

摘 要: 分析某富营养化水库长达 15 年的水质和藻类观测结果, 研究该水库水质及水生生态环境变化趋势, 评估各类污染防治措施的治理成效。提出富营养化防治是一个长期的工作, 应在科学研究的基础上, 有针对性地实施控源和生态防治相结合的治理措施。

关键词: 富营养化; 水库; 长期观测研究

中图分类号: X524

文献标识码: B

文章编号: 1674-6732(2013)-05-0041-06

Long Term Research and Monitoring of a Eutrophic Reservoir

ZHUANG Yi-ting¹, WEN Xiao-yan², LI Geng²

(1. Fujian Provincial Environmental Monitoring Central Station, Fuzhou, Fujian 350001, China; 2. Fuzhou Environmental Monitoring Station, Fuzhou, Fujian 350005, China)

ABSTRACT: Based on the 15 years' monitoring of algae and water quality of eutrophic reservoirs, water quality and changing tendency were studied to assess the effect of all kinds of pollution prevention measures. The result suggested that eutrophication control was a long time work. Measures of source control and ecological prevention should base on scientific research.

KEY WORDS: eutrophication; reservoir; long-term monitoring research

山仔水库位于福建省福州市境内, 是该市的主要水源地之一, 常年出现水华爆发, 影响到其供水、灌溉等使用功能。为控制污染, 当地有关部门采取了一系列的污染防控措施, 使富营养化污染得到有效控制。文章以该水库为研究对象, 通过对其主要水质指标和藻类连续 15 年的长期观测, 研究人类活动对其水库水生生态环境的影响, 评估所采取的防治措施的成效, 提出进一步防治富营养化污染的对策思路。

1 基本情况

1.1 水库概况

山仔水库位于福建省福州市罗源县、连江县和晋安 3 县(区)交界处(图 1)。敖江中上游, 库容为 $1.67 \times 10^8 \text{ m}^3$, 水面面积为 6.63 km^2 , 平均深度 25.1 m, 坝址处多年均径流量为 $30.4 \times 10^8 \text{ m}^3$; 坝址以上陆域面积 1646 km^2 , 包括古田、罗源、连江、闽侯和晋安区的 9 个乡镇。该区域 2008 年末人口 20.9 万人, 2008 年工农业总产值 17.41 亿元。该水库陆域多山地、溪流, 植被良好, 其中林地占陆域

总面积的 80.4%, 耕地占 12.1%, 园地占 1.4%, 居民用地占 0.9%, 自然环境保持较好, 自然资源开发潜力较大, 城镇化、工业化水平相对较低。

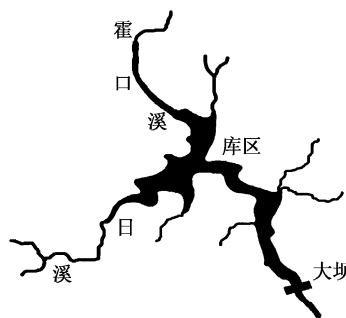


图 1 山仔水库库区形状及主要支流

水库地处中-南亚热带季风气候过渡区, 气候温暖, 年均气温 $14.7 \sim 19.4^\circ\text{C}$, 7 月份平均气温 $24.5 \sim 28.8^\circ\text{C}$, 1 月份平均气温 $7.3 \sim 10.0^\circ\text{C}$; 水库年平均水温 $20.3 \sim 22.4^\circ\text{C}$, 最高的月份为 7 月, 水

收稿日期: 2013-05-03; 修订日期: 2013-06-01

作者简介: 庄一廷(1963—), 男, 研究员级高工, 本科, 从事环境监测工作。

温在 30℃ 左右,水温最低的在 1 月,水温在 15℃ 左右。水库多年平均流量 29.10 m³/s,汛期为 4—9 月,枯水期为 10 月到次年 3 月,汛期径流总量占全年的 75.4%^[1]。

水库于 1994 年底建成蓄水,1995 年规划为福州市区集中式生活饮用水第二水源地,2001 年省政府颁布的《敖江流域水源保护管理办法》(福建省人民政府令 61 号)将库区划定为水源一级保护区,执行地表水环境质量(GB 3838—2002)Ⅱ类标准;坝址以上其余部分划定为水源二级保护区,执行地表水环境质量(GB 3838—2002)Ⅲ类标准。水库主要来水河流为霍口溪和日溪,上游地区工业以石材加工工业为主,规模均较小,年废水排放量在 25×10⁴ t/a 左右^[2]。区域内居民居住分散,除水库周边个别乡、镇外,居民生活污水基本上未经处理就地排放。库区水产养殖已经全部取缔,上游部分乡镇的小规模的水产养殖业基本上实现达标排放。水库周边陆域已划定为畜禽养殖禁养区,但仍残存零星的畜禽养殖企业。采用数学模型估算流域非点源污染负荷,农田和山林地所产生的负荷占较大比例,流域上游的古田县污染负荷总量最大,库区附近的晋安区单位面积污染负荷最大^[3]。

1.2 数据来源及检测方法

自 1996 年开始,福州市环境监测站在每年的 5、9、11 月对山仔水库进行例行监测,监测指标包括总氮、总磷、pH、溶解氧等富营养化相关水质理化指标和藻类生物量、优势种群等,2003 年及 2010 年隔月加密监测。水质理化指标监测方法依据水环境监测技术规范中推荐的方法,藻类定量及定性测定采用镜检法。

2 结果与分析

2.1 常规水质理化指标

山仔水库水体中藻类生物量较大,溶解氧均保持在 7 mg/L 以上,pH 呈弱碱性,藻类生长旺盛的夏、秋季出现高 pH、高溶解氧的情况,水体透明度降低至 0.5 m 左右。在春夏季库区会出现水体热分层现象,主要理化指标在垂线方向有较明显梯度变化(图 2—3)。

按《国家地表水水质标准(GB 3838—2002)》评价,水库水质常年在Ⅲ类或Ⅲ类以下,不符合其作为集中式饮用水水源地的水质功能要求,个别年

份还出现劣Ⅴ类水质。近年基本保持在Ⅲ类和Ⅳ类之间,主要超标项目是水体富营养化的特征指标总氮和总磷,表现出典型的水体富营养化污染特征。

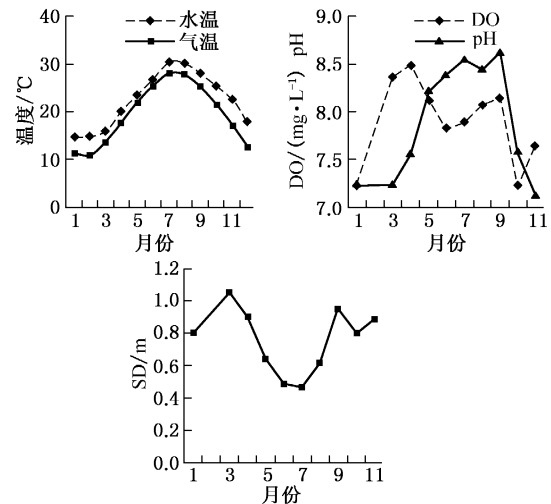


图2 山仔水库主要理化指标各月多年平均值(1996—2010 年)

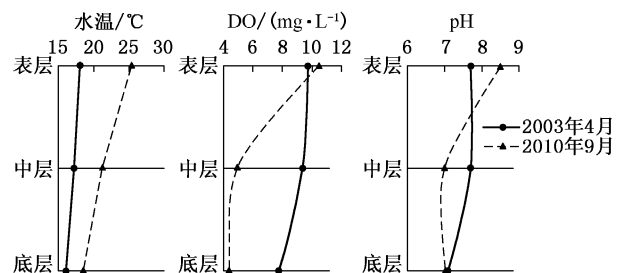


图3 山仔水库春夏季常规理化指标垂向变化

2.2 营养盐浓度变化

由于山仔水库在蓄水前没有彻底清理库底的污染物质,以及在蓄水初期流域环境管理工作薄弱,在建成后的前3年总氮和总磷的浓度出现高值期。随着库区底部沉积物中营养物质的逐步降解以及流域污染防控工作的不断推进,总氮、总磷的浓度在1998年之后逐年下降,总氮的浓度稳定在1 mg/L左右,总磷的年平均浓度稳定在0.05 mg/L左右,但每年的最高浓度在0.1 mg/L左右,多出现在春末夏初。比较2003年和2010年水库各月水库总氮、总磷平均浓度变化可见,2003年总氮变化的幅度较大,而2010年全年变化的幅度较小;总磷的2个年度的变化规律较类似,全年的变化幅度不大。上述结果表明:通过连续多年的水污染综合整治,外源性的氮、磷输入已得到较为有效的控制,进

入水体的营养盐负荷已基本趋于稳定,实施的水污染治理取得初步成效。水体中氮磷比自1997年开始逐年下降,目前稳定在15左右,水库中营养物质供应仍属磷紧缺型,藻类的生长状况受水体中磷浓度水平影响较大(图4—5)。

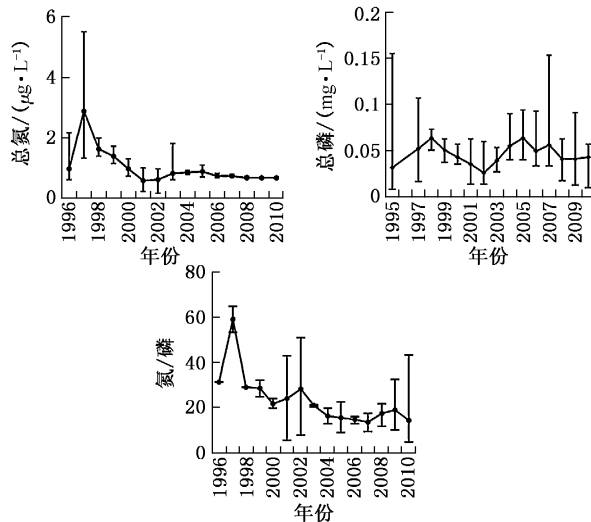


图4 山仔水库总氮、总磷年均浓度变化

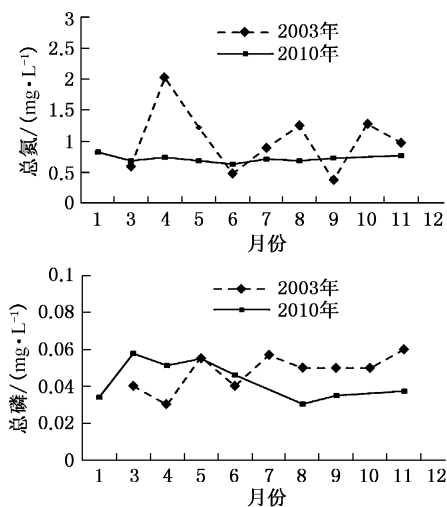


图5 山仔水库典型年份各月总氮、总磷浓度变化

2.3 藻类生物量及种群结构变化

山仔水库属于亚热带山地气候类型,四季分明,环境条件适合藻类的生长繁殖,加上在水库蓄水前及蓄水初期对库区及周边污染源控制不到位,氮、磷等营养物质浓度水平较高,使得水库长期处于藻类高生物量的状况。叶绿素a是藻类进行光合作用的主要色素,其浓度能反映藻类的生物量大小,从历史数据分析,山仔水库叶绿素最高值多年

来均保持在 50 mg/m^3 以上,表明每年在藻类生长高峰期水库均发生水华,持续时间也逐年增加。受气候条件及氮、磷等营养物质供应和循环的影响,水体中叶绿素a浓度年内一般会出现两个高峰,依当年的气温变化不同分别出现在4、5月和8、9月之间,表现出亚热带地区富营养化水体的典型特征(图6)。从上述结果表明,虽然水库营养盐浓度总体显著下降,但其藻类生物量仍保持在较高的水平上,春、夏季水华现象没有完全消除。

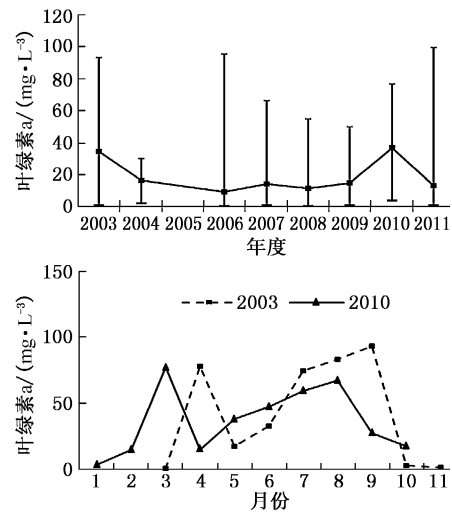


图6 山仔水库叶绿素a浓度变化

多年来在山仔水库发现的浮游植物涵盖了硅藻门、绿藻门、蓝藻门、隐藻门、甲藻门等主要淡水藻门类。优势种多为淡水湖库富营养化污染的特征种蓝藻(鱼腥藻、微囊藻),藻类种群的季节演替规律也较为明显,冬、春季以硅藻为主,夏、秋季以蓝藻和绿藻、隐藻为主,但近年这种典型的种群演替规律有所改变。对比2001年、2003年与2010年的藻类监测结果,2001年春季以隐藻门为主,夏季以蓝藻为主,冬季以硅藻为主;2003年绿藻和隐藻已较少见,硅藻在冬、春季成为优势种群;到2010年蓝藻几乎在四个季节都为优势种群,仅在冬季气温较低时硅藻成为优势种群之一,隐藻门和绿藻门的比例逐渐下降直至消失。这反映了在经历了长期的水体富营养化之后,水体中藻类种群结构向耐污种、小型种转变(图7)。

水库的藻类种群多样性也有所变化。1996年水库蓄水后的首次藻类调查,发现的藻类种类涵盖6个门共127种,种类最多的为绿藻门、硅藻门和

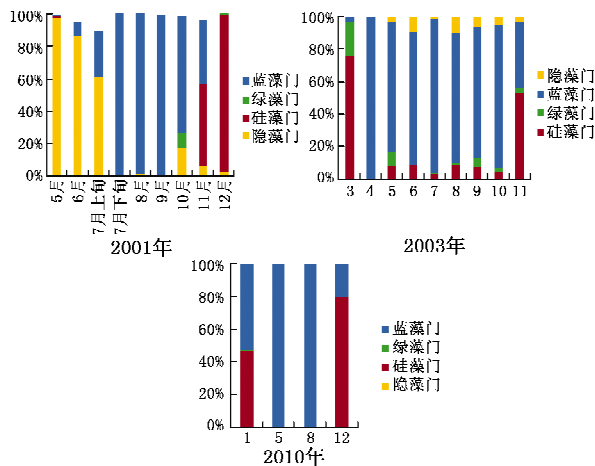


图7 山仔水库藻类种群结构年内变化

蓝藻门, 隐藻门、裸藻门次之, 甲藻门为偶见种。2001年调查发现的藻类有7个门29属47种, 优势种群主要是绿藻、硅藻和隐藻, 其中以绿藻门的小球藻、隐藻门的尖尾蓝隐藻和嗜蚀隐藻、硅藻门的狭形颗粒直链藻和尖针杆藻等种类较多, 和1996年调查结果比较, 绿藻门和蓝藻门种类数比例大幅增加, 蓝藻门增加的尤其显著, 而硅藻门、隐藻门的比例降低, 主要优势种由隐藻、绿藻、蓝藻、硅藻混合向以蓝藻(如鱼腥藻、微囊藻)和绿藻(小球藻)为主过渡, 优势种所占比例增加, 藻类种类数呈下降趋势, 种类多样性降低。2006年夏季共鉴定出藻类5个门34属52种, 主要优势种群是硅藻、绿藻和蓝藻。2008年夏季, 山仔水库仅发现25种藻类, 春夏季主要优势种类为蓝藻、硅藻和绿藻。2010年调查仅发现10种藻类, 除了蓝藻门之外, 其他藻类的种类数和细胞数量很少, 当年1月份开始就以蓝藻门的凯氏鱼腥藻即成为优势种, 3月份其藻细胞密度就达 10^8 cells/L以上, 开始出现藻类水华现象, 随后其藻细胞密度有所降低但仍为主要优势种, 铜绿微囊藻开始出现, 到7月份铜绿微囊藻发展成为优势种, 并一直持续到9月份。上述结果表明, 由于多年以来水体富营养化的影响, 水中藻类种群多样性逐年降低, 正常的水生生态平衡已受到了破坏。

2.4 水库富营养化污染防控工作

为防控山仔水库富营养化污染, 保证水源地安全, 流域内政府相关部门有针对性地开展了水库富营养化污染防治工作, 控制入库营养盐污染源排放、保护与修复库区生态和加强环境监管。

为控制入库污染负荷, 搬迁了库区周边居民, 取缔库区网箱养鱼, 设置水源保护区隔离带。实施畜禽养殖和工业污染治理, 对流域内污染源实施搬迁、关闭和限期治理等治理措施。结合农村家园清洁行动, 建设村镇等居民集中居住点生活污水处理和垃圾收集、处理设施。

针对流域非点源污染所占比重较大的特点, 建设水源涵养林保护区, 控制并逐步削减易造成水土流失的经济林和果林面积。借鉴国内湖库水体富营养化防治经验, 开展扬水筒示范工程的探索研究, 以改善底层水体的厌氧状态和水体热分层现象。根据保护优先、以鱼治水的原则, 开展非投饵生态渔业养殖, 2006年开始每年投放鱼苗, 以鲢鱼、鳙鱼等滤食性鱼类为主, 辅以鲮鱼、鲤鱼、鳊鱼、草鱼等种类, 至今共投放约200万尾鱼苗, 以期通过生物调控, 形成合理的水生生物食物链达到控制藻类数量的目的。

推进监管机制的创新, 实施污染设施社会化营运。结合农村扶贫工作, 设立水源保护区发展扶持资金, 引导区内农民发展生态农业、生态公益林建设等无污染产业, 解决水源保护区内部分群众的生活困难问题, 并将库区生活困难农村居民纳入低保范围。

3 讨论

3.1 削减污染负荷与控制营养盐浓度

削减污染负荷, 降低水体中营养盐浓度, 是富营养化污染防治的首选措施。一般认为, 水体中总氮、总磷的浓度分别降低到0.35 mg/L和0.035 mg/L以下, 藻类水华爆发可以得到基本控制。经过5年左右的污染防控工作, 山仔水库水体中总氮、总磷的浓度有显著下降, 分别保持在1 mg/L和0.05 mg/L左右, 离上述控制水华的浓度阈值仍有一定的距离, 究其原因是流域的营养盐污染控制并未达到预想的水平。根据福建省内另一个与山仔水库环境条件类似的山区水库的研究结果, 在进入水库的总污染负荷中, 点源污染负荷(包括库区周边居民生活及畜禽养殖等)一般占总污染负荷的50%左右, 非点源污染占20%~35%左右, 大气沉降占5%左右, 沉积物释放导致的内源性污染占10%~25%左右^[4]。以上述结果推算, 山仔水库在控制了外源性点源负荷后, 仍有50%左右的污染

负荷存在,如要继续降低,必须更严格地实施水库周边污染源控制,并应对因水土流失产生的非点源污染负荷以及沉积物释放采取,进一步降低进入水体的污染负荷。

历年水质监测结果表明,山仔水库水体中氮、磷等营养盐浓度逐年下降并趋于稳定,但与此形成鲜明的对照,水体中藻类生物量没有明显降低。由环保志愿者近年来在藻类生长旺盛季节,每天对水体透明度等感官指标的监测结果表明,每年的3—9月,有50%左右的天数水体透明度小于或等于0.5 m,最小值不及0.2 m,特别是5—7月间透明度基本全部在0.5 m以下,表明每年在此季节水华爆发的频率相当高。出现这种措施与成效之间的背离现象的原因,笔者以为这是由于目前国内富营养化大多数湖库生态系统所承受的压力,已远远超过了其耐受限,如果仅仅消除污染对生态系统的胁迫压力,环境条件恢复到发生富营养化之前的状态,还不能破坏当前其所处的富营养化环境,处于富营养化状态的水生生态系统无法从以藻类为主的浊水型向以大型水生植物为主的清水型转变,只有破坏目前已趋于稳态的富营养化状态,才能重建可承受一定污染负荷的、可抗环境灾变的健康水生生态系统。对于类似于山仔水库的富营养化湖库而言,削减外源性营养盐负荷,一般来说只能缓解其富营养化的速度,这只是富营养化污染防治工作的起步阶段,只有坚持有针对性的、持续有效的营养盐的污染控制,在比较长的时间内保持水体中氮、磷的浓度在较低的水平,才能实现水体富营养化的防治目标。这是一个比较漫长的过程,需要十几年甚至几十年的坚持和努力。

在目前的发展条件下,要在湖库的全流域范围内实施严格的非点源污染控制是比较困难的,试图参照国外湖库富营养化污染治理的做法,通过全面控制进入水体的营养盐污染负荷,逐步将水体氮、磷的浓度水平降至维持藻类生长的阈值之下,在短期内是难以实现的。在此情况下,笔者以为应集中技术优势和有限的财力,首先解决治理难度相对较小的点源污染治理,以控制水体富营养化导致的水质恶化的趋势,其次在局部地区解决富营养化对人类生产生活的直接影响,如危害饮用水源水质安全、娱乐水体水质破坏等迫切的问题,最后通过合理生态修复措施,逐步实现全部水体水生生态的恢

复。笔者以为这种循序渐进的治理思路符合中国国情的、相对更切实可行的。

3.2 采用生态技术解决水体富营养化问题

水华是富营养化污染对水生生态环境最大的危害,发生的原因是水体中营养物质的过量供给,而导致藻类在短时间内过度增长并积聚,从表象上看是一个污染现象,但从其发生的机理和危害上看是由于水生生物生存环境的破坏而产生的生态灾难,只有用生态学的方法才能恢复业已受到破坏的生态环境。从污染控制到生态恢复,这是人类对水体富营养化防治认识上的飞跃。从生态学的角度认识富营养化污染防治,就是要改变由于单一种类的藻类过度生长,侵占了其他水生生物的生长空间,而形成类似于荒漠化的水生生态环境,恢复具有良好水质自我修复能力和生物多样性的健康水生生态环境。从另一角度看,就是通过消除压力,重建有利的环境条件,使水生生态系统恢复到我们所需要的某种理想的状态^[5]。湖库富营养化的生态恢复,应从其整体以及与之相关联的陆域生态系统来做综合的考虑,而不应简单地认为成放养滤食性鱼类、恢复大型水生植物等单一治理措施的应用。

山仔水库富营养化污染防治投入了大量的资金进行营养盐污染控制,还进行了诸如放养滤食性鱼类、利用扬水筒技术消除水体热分层等局部生态恢复措施,富营养化污染加重的趋势得到遏制,水体中氮、磷的浓度水平也趋于稳定,但是水华发生的现象没有彻底消除,藻类生物多样性仍受到破坏。笔者以为,应从群落或生态系统的水平上,恢复能吸收营养物质并对藻类生长有抑制作用的水生高等植物群落,构建有效控制藻类生长的浮游动物、鱼类等生物种群结构,建设能有效隔绝陆域非点源污染负荷的库滨带生物湿地系统,形成健康、平衡、具有水体自我净化能力的水生生态系统。实现这一目标,要从研究水生生态系统中重要生物种群的结构、功能和特点入手,研究开发可逐步调节生态系统结构与功能、改善水质并建立健康水生态系统的成套技术。所实施的生态恢复工程,应在对湖库生态系统充分研究的基础上,因地制宜地采取有针对性的措施,并进行适当规模的现场实验检验其实施效果,研究可能产生的不利影响,不能简单地照搬其他地区成功案例的经验,或是仅依据有限

的实验室模拟实验的结果和理论推定,动辄投入巨资实施生态恢复工程,其结果不仅浪费了资金和人力,还可能破坏原本脆弱的湖泊生态系统。

3.3 重视鱼类控藻效果的研究

控藻的方法有物理、化学、生物以及机械除藻等多种。利用生物操纵的原理,改变食物链中各营养层级生物量的比例,通过调整摄食压力来控制藻类的生长是目前国内外常用的生物控藻方法。国外依据传统的生物操纵理论,通过增加肉食性鱼类的比例,摄食浮游动物食性鱼类,保护能摄食藻类的浮游动物,增加其对藻类的摄食压力以控制藻类的数量。与此不同,国内有关学者提出增加鲢、鳙鱼等滤食性鱼类,直接摄食藻类控制其生物量的非经典生物操纵理论,人工放养鲢鱼、鳙鱼等滤食性鱼类,在武汉东湖、滇池、巢湖等富营养化湖泊的污染治理中得到应用,成为目前国内广泛应用的生物控藻技术^[6]。基于滤食性鱼类一定能够摄食藻类的普遍认识,出现水华后放养滤食性鱼类就成了首选的控制措施。

山仔水库在近年也大量放养了滤食性鱼类,一定程度上减轻了水华的程度,但监测数据和人工观测的结果均表明,春夏季水华仍时常发生,水体中藻类多样性也逐年下降,藻类的优势种转以小个体的蓝藻、硅藻为主,种群结构出现小型化的趋势。这是因为滤食性鱼类在摄食藻类的同时也会摄食浮游动物,使小型藻类减少了摄食压力,会增加小型藻类的生物量,总体上并未减少藻类的生物量,反而使藻类种群结构向小型化转变。其次不同的湖库水体,藻类优势种也不尽相同,由于鱼类在摄食时具有一定的选择性,有研究表明,只有在其食物供给限制为蓝藻时才会选择摄食蓝藻,因此要求放养的鱼类要达到一定的密度,控藻效果才能体现,如不针对具体情况,采用相同的“养鱼控藻”治理方案,其结果并不一定能达到预想的要求。第三,藻类死亡后,释放到水体中的氮、磷等营养物质,多数是以有机态和颗粒态的形式存在^[7],这部分的营养物质需要通过复杂的降解过程转化为能被藻类直接吸收活性态,才能作为藻类生长的养分,鱼类对藻类的摄食,其体内的消化过程会加速这一转化过程,并随着鱼类的排泄重新进入水体,这会加快水体中营养物质的循环利用速度,增加营

养物质的供给,有利于藻类的生长。第四,藻类中食物的选择性消化,使难消化的藻类被摄食后未完全消化而又迅速排放到水体中,这样水体中藻类的生物量并没有真正的减少。基于以上分析,在没有弄清藻类的种群结构与滤食性鱼类的生活习性的情况下,盲目大规模人工放养以四大家鱼为主体的鱼类,不仅不能起到预期的控藻效果,还有可能使浮游水生生物的种群结构发生变化,对水体生态系统的结构和功能产生新的不利影响,其影响甚至可能比水华本身的破坏更严重。因此,要在大规模放养滤食性鱼类之前,要开展水生生物调查,掌握藻类的优势种群和当地正常水体鱼类的种群结构,正确选择合适的放养鱼种以及各食性鱼类的比例,除放养滤食性鱼类外,也要放养一定比例的杂食性鱼类和少量的草食性、肉食性鱼类,并尽可能选用本地种作为放养的主要品种。还要开展对浮游动、植物种群结构的定期调查,掌握放养鱼的效果,调整放养的比例和数量。

4 结论

通过对山仔水库水质及藻类连续多年的监测,表明水体中营养盐的浓度逐年下降,富营养化污染防治工作成效明显,但水华发生的现象没有完全消除,水体藻类生物量仍较大。应持之以恒地采取措施,在有效控制营养盐污染负荷的基础上,采取科学的生态恢复措施,经过一段较长时期的综合治理,才能实现富营养防治的目标。

[参考文献]

- [1] 福州市环保局.《敖江流域环境保护规划》[Z]. 2006.
- [2] 福建省环境监测中心站.《敖江流域地表水浊度标准》研究[R]. 2007.
- [3] 《山仔水库富营养化成因和防治对策研究》课题组.《山仔水库富营养化成因和防治对策研究》[R]. 2003.
- [4] 福建省环境监测中心站. 杜塘水库富营养化污染成因及防治对策研究[R]. 2011.
- [5] 宋旭,蔡继杰,丁学锋,等. 富营养化水体生态修复技术发展综述[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 465-468.
- [6] 刘建康,谢平. 揭开武汉东湖蓝藻水华消失之谜[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(3): 312-319.
- [7] 孙小静,秦伯强,朱广伟. 蓝藻死亡分解过程中胶体态磷、氮、有机碳的释放[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 341-345.