

XINJIAN SHUIKU

Xushui Chuqi Fu Yingyang Hua Fasheng Jili Yanjiu

新建水库

蓄水初期富营养化发生机理研究

朱立琴 姜翠玲 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

新建水库蓄水初期富营养化发生机理研究

朱立琴 姜翠玲 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以新建水库——浙江省湖州市老虎潭水库为研究对象,采用数值模拟、室内和室外实验相结合的方法,开展了新建水库蓄水初期水体富营养化发生机理与控制对策研究,填补了国内外关于中小型新建水库蓄水初期富营养化理论研究的空白,为形成新建水库富营养化的系统理论奠定了重要基础,为中小型水库建设和新建水库水质恶化的防治提供科学依据,具有非常重要的现实意义和实践价值。

图书在版编目(CIP)数据

新建水库蓄水初期富营养化发生机理研究/朱立琴,
姜翠玲著. —徐州:中国矿业大学出版社,2013.1
ISBN 978 - 7 - 5646 - 1727 - 1

I. ①新… II. ①朱…②姜… III. ①水库—富营养
化—研究 IV. ①X522

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 287732 号

书 名 新建水库蓄水初期富营养化发生机理研究
著 者 朱立琴 姜翠玲
责任编辑 张怡菲
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州市今日彩色印刷有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 8.25 字数 203 千字
版次印次 2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷
定 价 26.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

当前我国水污染呈现全面、复杂和严重化的特点,致使我国饮用水水源地面临严重的威胁。水库作为缓解水资源短缺的重要措施,是保障城市及周边农村经济发展和居民生活的重要基础。截至 2006 年年底,我国已建成各类水库 87 085 座,总库容达 5 900 亿 m^3 以上。然而,很多新建水库在初蓄水期间就出现了富营养化问题,严重影响了水库的供水功能,对周围生态环境产生了一定的负面影响,制约了流域社会经济的可持续发展。

目前,大多数研究者都将富营养化问题的研究重心放在天然湖泊或是运行多年的成熟水库上,围绕其富营养化成因、危害和控制展开了一系列的理论研究,而对于新建水库这一特殊对象,却鲜有人关注。相对于天然湖泊和成熟水库渐进而漫长的富营养化过程,新建水库的富营养化现象往往是突发和短暂的。新建水库初蓄水可以看做是人为的将陆地生态系统转变为水生生态系统的过程,期间水库受人为调蓄作用水位变化较大,生态系统较为脆弱,同时,受上游来水、淹没区土壤和植物残体中污染物释放等外界因素的影响,水库容易出现富营养化现象,引起蓝藻水华发生。因此,对新建水库蓄水初期富营养化问题的研究较一般水体更为复杂且意义重大。

本书以新建水库——浙江省湖州市老虎潭水库为例,开展了新建水库蓄水初期水体富营养化发生机理与控制对策研究,填补了国内外关于中小型新建水库蓄水初期富营养化理论研究的空白,主要创新成果有:① 尝试研究并提出了库区不同用地类型(竹林地、建筑用地、水稻田和山林地)土壤在水体淹没条件下污染物的释放规律及其对水库水质的影响;② 初步揭示了实际蓄水过程中土壤污染物释放对新建水库水质的影响机制;③ 从水位变化、入库河流水质、土壤污染物释放和生态系统脆弱性四个方面,系统地探讨了新建水库蓄水初期富营养化与蓝藻水华暴发关系的机理,为形成新建水库富营养化的系统理论奠定了重要基础。

本书第一章由谢明华和胡小琴撰写,第二章由谢向前撰写,第三章、第四章由姜翠玲撰写,第五章由谢明华撰写,第六章、第七章、第八章由朱立琴撰写。全书由朱立琴最后审订和统稿。在本书的编写过程中,得到了河海大学水文水资源学院诸多领导和老师的关心和支持。本书有些内容采用了“老虎潭水库水质控制技术研究”项目的部分成果,为此,作者感谢该项目参与者所提供的资料。项目参与者还包括河海大学李宁硕士、成均玉硕士以及浙江省水利勘测设计院和中环水务投资有限公司的部分同志,在此一并致以诚挚的谢意。

朱立琴

2012 年 9 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究目的及意义	1
1.2 水库富营养化影响因素	2
1.3 国内外湖库富营养化状况	7
1.4 富营养化问题研究进展	9
1.5 新建水库研究进展	16
1.6 研究内容和技术路线	19
2 蓄水前库区环境基本特征	21
2.1 流域概况	21
2.2 流域污染特征	23
2.3 库区水环境时空变化特征	25
2.4 库区土壤污染物分布特征	30
2.5 小结	33
3 蓄水前土壤和植物残体污染物释放模拟研究	34
3.1 库区土壤污染物释放模拟研究	34
3.2 库区植被残体污染物含量估算	40
3.3 水库建设前清库措施	41
3.4 小结	42
4 蓄水初期库区水环境变化特征及主导因子判定	43
4.1 建成后水库概况	43
4.2 蓄水初期库区水环境时空变化规律	43
4.3 环境影响因子相关性分析	50
4.4 环境主导因子的判定	54
4.5 小结	56
5 水库富营养化评价及预测	58
5.1 评价参数与标准	58
5.2 评价模型的选择	61
5.3 富营养化评价	66
5.4 富营养化预测	72

5.5 小结..... 77

6 新建水库蓄水初期富营养化发生机理研究..... 78

6.1 主要入库河流对库区水环境的影响..... 78

6.2 土壤污染物释放对库区水环境的影响..... 81

6.3 生态系统脆弱性对库区水质的影响..... 83

6.4 水位变化对库区水质的影响..... 86

6.5 各因子影响程度模拟研究..... 87

6.6 小结 104

7 新建水库蓄水初期富营养化控制对策研究 108

7.1 工程措施 108

7.2 非工程措施 111

7.3 小结 114

8 结论与展望 115

8.1 主要结论 115

8.2 研究的创新点 116

8.3 研究展望 116

参考文献..... 117

1 绪论

1.1 研究目的及意义

水库是我国水利工程体系的重要组成部分,具有防洪、发电、灌溉、供水、航运、养殖、旅游、生态等多种功能,是调控水资源时空分布、优化水资源配置最重要的工程措施之一,是拦、排、滞、分相结合的江河防洪工程体系中不可替代的重要组成,是国民经济的重要基础设施。随着中国经济社会的快速发展,国民经济各领域对水库的依赖愈显突出。

尤其当前我国水污染呈现全面、复杂和严重化的特点,致使我国饮用水水源地面临严重的威胁。修建水库作为缓解水资源短缺的重要措施,是保障城市及周边农村经济发展和居民生活质量的重要基础。根据 2007 年初水利部开展的全国水库大坝安全状况普查统计,截至 2006 年年底,我国已建成各类水库 87 085 座(不含港、澳、台地区,下同),总库容达 5 900 多亿 m^3 ,相当于全国河川年径流总量的 $1/5$ 。水库控制的灌溉总面积达 19 万 km^2 ,占全国有效灌溉面积的 $1/3$ 。水库工程供水能力为 2 400 亿 m^3 ,占全国水利工程实际供水能力的 36.5%,每年约向城市供水 200 亿 m^3 。

从 20 世纪初开始,随着社会经济的长足发展,库区资源的开发利用活动大幅增加,水质污染日益严重。近 20 年来,我国大中型水库营养水平普遍较高,绝大部分大中型水库已经处于富营养化状态或已具备发生富营养化的条件。而很多新建水库在初蓄水期间就出现了富营养化问题,严重影响了水库日后正常使用功能的发挥,对周围生态环境产生了一定的负面影响,严重制约了流域社会经济的可持续发展。

目前,大多数研究者都将富营养化问题的研究重心放在天然湖泊或是运行多年的成熟水库上,如美国的五大湖、日本的霞浦湖和琵琶湖、欧洲的巴拉顿湖、卢加诺湖,国内的“三湖”、于桥水库、官厅水库等都是主要的研究对象,围绕富营养化成因、危害和控制展开了一系列的理论研究,取得了大量的研究成果,为解决水环境水生态问题作出了重大的贡献。迄今为止,鲜有研究关注新建水库这一特殊的对象。

天然湖泊和成熟水库的富营养化是在大量外源物质的输入和内在生物学过程起主导作用下产生的,其变化过程是渐进的和漫长的,虽然这些湖库早已具有完整的水生生态系统结构,拥有较强的自净能力和水环境承载能力,但仍然不可避免地发生了富营养化现象。而新建水库初蓄水可以看做是人为地将陆地生态系统转变为水生生态系统的过程,期间物质循环、能量流动以及物种迁移与演变异常活跃,生态系统受多种因素的影响,容易发生富营养化,在局部区域出现蓝藻暴发的现象,其变化过程是突发的和短暂的。因此,对新建水库在蓄水初期的研究较一般水体更为复杂且意义重大。

本书以新建水库老虎潭为研究对象,蓄水前对库区生态环境进行调查和监测,评价库区水环境状况和土壤污染物累积水平,并在实验室进行了土壤和植物残体污染物释放模拟,研

究蓄水初期土壤与进水相互作用下污染物的释放规律,揭示土壤中污染物的释放及对老虎潭水库水质的影响机制;测算植物残体中营养物质的含量;并根据实验结果制定并实施了蓄水前的清库措施。蓄水后跟踪监测水库蓄水初期水环境的连续变化过程,研究各环境因子间的相关关系,从水位变化、入库河流水质、土壤污染物释放和生态系统四个方面,揭示蓄水初期水库富营养化和蓝藻暴发的机理,最终建立新建水库蓄水初期水动力和水质模型,提出新建水库富营养化控制措施。本书有助于丰富水体富营养化研究的内涵,为新建水库生态系统演变过程和水利工程建设对生态环境影响的研究奠定了重要基础,对水库的建设和管理工作提供科学的理论依据。

1.2 水库富营养化影响因素

水体富营养化分为天然富营养化和人为富营养化。天然富营养化过程是一个自然演变过程。世界上许多湖泊,它们在数千万年前,或者更远年代的幼年时期,均处于贫营养化状态。随着时间的推移和环境的变化,一方面从天然降水中接纳氮、磷等营养物质,另一方面土壤的自然淋溶、渗透也使大量的营养元素进入湖内,逐渐增加了湖泊水体的营养物质含量,造成大量的浮游植物和其它水生植物的生长。这种湖泊营养物质的天然富集,使湖水营养物质浓度逐渐升高,从而导致水质变化的过程就是天然富营养化。从天然环境中获得的氮、磷等营养物质一般数量都非常少,因而演变的过程极其缓慢,往往需要以地质年代来描述天然富营养化的过程。

随着人类对环境资源的开发利用活动日益加剧,特别是进入 20 世纪以来,工业化带来的“城市化”现象,集中发生在一些水源丰富的特定地区。大量富含氮、磷等营养物质的工业废水和生活污水被排放到周围的湖泊、河流和水库,增加了这些水体的营养物质负荷量。同时,由于农业生产中农作物产量提高的需要,化肥和农药施用量的逐年增加,大量未被农作物吸收的营养物质经过雨水冲刷和渗透,最终流失而被输送到水体中。此外,畜牧业中的牲畜粪便以及水产养殖业中投放的饵料也成为水体接纳氮、磷等营养物质的重要渠道。所有这些人为因素的影响,使得水体由原来营养物质浓度较低的贫营养状态迅速演变为营养物质浓度较高的富营养化状态。这种由于人类活动影响造成水体富营养化的过程叫做人为富营养化^①。

富营养化是一种水体衰老的现象,其过程如图 1-1 所示,当人类活动产生的生活污水、化肥和食品等工业废水,以及自然降水产生的地表径流中含有的氮、磷及其他无机盐等营养物质输入湖泊、水库、河口、海湾等缓流水体,增加了水体中营养物质的含量,促使自养型生物——大型绿色植物和微型藻类迅速繁殖,水体溶解氧下降,最终导致水质恶化,鱼类及其他生物大量死亡的现象。

富营养化破坏了水体原有的生态系统的平衡,导致湖泊、水库等内陆水体失去原有的自然生态系统结构,从而使该系统处于恶性循环当中^②。富营养化过程包含着一系列生物、化学和物理变化,与水体物理、化学性质、水体形态和底质以及气象、地理等众多因素有关。与

① 秦伯强,许海,董百丽.富营养化湖泊治理的理论与实践[M].北京:高等教育出版社,2011.

② 金相灿,刘树坤,章宗涉.中国湖泊环境(第一册)[M].北京:海洋出版社,1995.

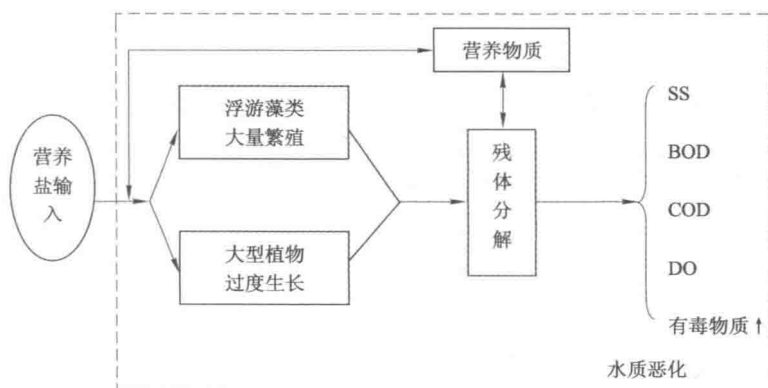


图 1-1 水体富营养化的基本过程

湖泊不同,水库为半人工生态系统,受人为影响更为严重,其富营养化影响因素更为复杂。

1.2.1 水库类型和水库功能

流域是通过水循环自然连接的整体,生态水文和人类开发活动制约着流域内地表水的水质变化,在不同地域内,这两种作用的强度与和谐程度具有差异性,导致流域内地表水的水质具有一定的空间格局。由于水库补给系数大,流域对水库水量水质影响占主导地位。不同地区的水库由于入库河道流域内地质、地貌不同,经济发展水平差距,因此各河道的污染物负荷不同。按照水库水域特征可分为湖泊型和河道型。河道型水库多为山区,人口密度小,河流径流量大、坡降大,故入库污染负荷较小;而湖泊型水库多为丘陵地区或平原地区,人口密度大,入库污染负荷大,故湖泊型水库水质较差。王孟等^①对长江流域 27 座大型水库中包括 14 座河道型水库和 13 座湖泊型水库进行营养状态调查和评价,其中河道型水库为富营养型的有 3 座,占河道型水库的 21.4%;湖泊型水库中有 9 座富营养水库,占湖泊型水库的 69.2%。以发电为主的水库 30% 达到富营养标准,而以灌溉为主的水库中达到富营养的占 53.8%。不同用途的水库其水滞留时间,出库水流深度、流速和出水口位置是各不相同的,这主要是由于不同水库调度方式的时空异质性而引起的。不同水层的水质是不一样的,水库营养物浓度在竖向存在明显分层,深层的营养物浓度明显高于表层。因此采用不同的水库调度方式,可以影响水库的营养物的水平及其分布。在水库具体运行管理过程中,出库水流可影响水库的水流及垂直分层,从而影响水库水动力学过程,使水库水质发生变化。贾海峰等^②对密云水库研究表明,采用底层放水的方式去除营养负荷与排放表层水相比,使无机磷排放量增加一倍左右。

1.2.2 水文及水动力条件

水文情势包括水量吞吐,水位变化和水团的运动。水文情势对水质的作用主要表现在水位和水滞留时间的调节,改变浮游植物种类组成,稀释或降低浮游植物的现存量,破坏藻

① 王孟,邹红娟,马经安.长江流域大型水库富营养化特征及成因分析[J].长江流域资源与环境,2004(05):477-481.

② 贾海峰,程声通,丁建华,等.水库调度和营养物消减关系的探讨[J].环境科学,2001(04):104-107.

类的生存条件。

水在库区的滞留情况和水量交换情况直接影响悬浮物的沉淀及磷等有机物的滞留。水库水滞留时间的长短决定了水库中浮游生物种群能否维持,滞留时间太短,浮游生物由于缺乏足够的时间进行繁殖,种群数量难以维持。红枫水库和百花水库近年来由于水资源的短缺,工业及投饵网箱养鱼业的发展,水环境容量的降低和排污量的增加,尤其是 20 世纪 80 年代以来,平均年入库水量比前 10 年分别减少 2.247 亿 m^3 和 2.940 亿 m^3 ,年均下降率分别为 2.56% 和 2.76%,水资源的短缺,使两电站发电量大幅削减,两水库在平水期或枯水年均停机不能发电,使库区水滞留时间分别达 1.24 年和 1.15 年,导致这两座水库 1996 年以来几乎年年发生水华。以发电为主的陆水水库于 1959 年建成。其总氮和总磷含量均为 II—III 类标准,然而,2001 年 3 月在副坝和大坝附近水域大量的束丝藻等丝状藻漂浮水面,藻细胞达每升数千万个,时间长达一个月。分析表明,主要是由于该水库自 1998 年洪水以后,除电厂少量用水以外,无其它用水,水滞留时间长达两年多所致。显然,在枯水期或枯水年,水流变缓,滞留时间过长,易发生水华。水滞留时间的长短与水库水质密切相关。Kawara 等(1998)对 Asahi 水库研究表明^①,根据氮磷指标 Asahi 水库 1980 年已达到富营养程度,但很少发现浮游植物疯长的情况,只有当水滞留时间超过 2 周以上时,浮游植物才能维持较高的种群数量。总之,水在库区的滞留情况和水量交换情况直接影响营养物质的输入输出,水滞留时间长短直接影响水库的水质状况和富营养化的程度。加大水库水量的交换,缩短水滞留时间,有利于抑制富营养化的发展。

水库是通过人工对水量的调蓄来实现各项功能运转,这种调蓄作用通过进出水量平衡和水库平面形态决定水位的变化。同时,水又是物质的载体,溶解的和溶解的物质随着水团的运动发生物理的,化学的和生物的混合、分布、迁移和转化过程,因此,水库的调蓄作用即水位的变化不仅影响水体的水量平衡,也影响水体理化性状和生态过程。对黑龙滩水库不同水位时的理化指标分析表明,高水位时透明度(SD)、电导率、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 NO_3^- 和总氮含量均比低水位时略高,而 COD、 NH_4^+ 、TP 和 PO_4^{3-} 含量则比低水位时低,这些均表明高水位时进入水库的营养物和氧含量比低水位时高,也反映了外源性营养在水库营养收支平衡中的重要作用。

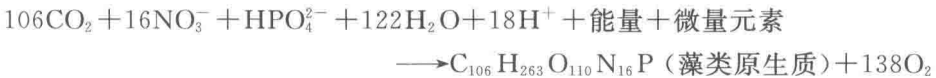
水库的水位一般由水库的调蓄决定的,水位的高低反映了水库的水量平衡,当水位高时表明水量大,反之则小。库区水质与蓄水量密切相关,入库水量越大,水体自净能力越强,水质越好,反之,入库水量越少即水位越低,水质越差。许多研究表明,水位与浮游植物现存量存在着显著的负相关关系,在枯水年(期),尽可能保持高水位有益水质的改善。表现在:① 水位高,库容大,对浮游植物有稀释作用;② 高水位时水体有跃温层出现,水体保持相对静止,抑制库底营养向水中释放,浮游生物现存量低;③ 高水位可扩大鱼类产卵场和鱼类补充群体,从而增加对蓝绿藻的摄食压力,这种通过食物链及营养级联作用的下行影响,可控制这些藻类的群体,有益防止藻类的孳生和水华的形成。

1.2.3 营养盐浓度

根据生态学原理,在正常情况下,氮、磷等营养元素在湖库中的存量很少,是水生植物生

^① O. Kawara, E. Yura, S. Fujii et al. A study on the role of hydraulic retention time in eutrophication of the Asahi River Dam reservoir[J]. Water Science and Technology. 1998. 37(2):245-252.

长、繁殖的限制因子,使湖库各物种间在数量比例上形成平衡。由于人类活动的影响,营养物质尤其是氮、磷的长期输入,容易使水体中的营养盐在短时间内大量蓄积,藻类的生长限制因子被解除。根据计算,每 1 g 氮可增殖 10.8 g 藻类,每 1 g 磷可增殖 78 g 藻类,水体中氮、磷含量直接决定了藻类的增殖速率,从而导致藻类的过量繁殖,形成水体富营养化。一般认为当水体中 TP 和 TN 的浓度分别达到 0.02 mg/l 和 0.2 mg/l 时,从营养盐单因子考虑,就有可能发生藻类疯长的现象。水体中氮磷比(TN: TP)会显著影响着浮游植物的种群组成。在对世界上 17 个湖泊的研究表明,当水体中 TN: TP 小于 29 时,形成水华的蓝藻就会成为湖泊中的优势藻类。而氮、磷浓度的比值不仅对种群组成有影响,而且也与藻类增殖有着密切关系。



按照营养物质的来源按进入水体的途径可分为外源污染和内源污染。外源污染又分为点源污染和非点源污染。点源污染是指那些通过特定的排污管网直接排入水体的污染源,如流域的工矿企业、城镇生活污水等,如今,点源污染已经逐步得到较好的控制和治理。非点源污染如农业施肥中农田渗漏水、家禽畜养殖污水、水产养殖中过量饵料污染、大气沉降的尘埃等。非点源污染经过流域的调蓄,最终汇入河流和湖库的污染物质要小于其产生量,但总的来说,负荷量也是相当可观的,以非点源方式排放的污染物已经成为河流、湖泊水质恶化和富营养化的主要来源。

内源污染是指水体沉积物与水体之间进行物质交换时,水底沉积物中的液态营养盐向上覆水中释放,在动力作用下营养盐再悬浮,造成水体富营养化。许多报告指出,水体沉积物中营养盐的释放是水体中污染物的重要来源之一。对太湖底泥的调查表明,湖底沉积物中每年向水体释放的总氮和磷约占总负荷的 25%~35%,表层底泥 TN 和 TP 平均含量分别为 0.92% 和 0.006%。西湖富营养化的一个重要原因是底泥厚达 0.86 m,全湖年均释放 7.22 t 磷,相当于外源磷的两倍。底泥中营养盐的大量释放可在湖湾区引发湖泛,构成水源的二次污染。在这种因素影响下,即使大幅度削减外源污染负荷,在特定条件下,高温少雨仍可能引起藻类暴发,使水体很多年都处于富营养的状态。由此可见,在外源污染得到控制后,底泥释放可能成为首要污染源,是水体藻类暴发的关键因素。底泥中的物理、化学条件易受外界影响而复杂多变,底泥的物质结构复杂,演化途径多样,这些都给底泥研究带来很多困难,相关营养盐释放规律的研究,日益成为关注的焦点。

1.2.4 自然条件

藻类的生长速率过快是引起水体富营养化的必要条件,经过研究,藻类生长速率与光照和水温条件、营养盐浓度、水动力条件的对应关系:

$$\mu = f(T) \cdot \min[f(P), f(N)] \cdot f(L) \cdot f(u) \quad (1-1)$$

其中:

$$f(T) = \mu_{\max} \cdot \theta^{T-T_{\max}}$$

$$f(P) = \frac{TP}{TP + KP}$$

$$f(N) = \frac{TN}{TN + KN}$$

$$f(L) = \frac{1}{\alpha h} \ln \frac{I_0 + I_s}{I_0 e^{-2\alpha h} + I_s}$$

$$f(u) = v^u$$

式中 $\mu, \mu_{\max}$ ——藻类实际生长速率、藻类最大生长速率, l/s;
 $T, T_{\max}, \theta$ ——水体实际水温、藻类生长所需最佳温度、温度修正系数;
 I_0, I_s ——水面辐射强度、光半饱和常数, kcal/(m²·d);
 h ——水深;
 α ——水体综合消光系数, l/m;
 TP, KP ——水体总磷浓度、磷半饱和常数, g/m³;
 TN, KN ——水体总氮浓度、氮半饱和常数, g/m³;
 v, γ ——待定系数。^①

由公式可以看出, 适宜的温度、光照、水动力条件对藻类的生长有较大影响, 与水体富营养化有密切的关系。在适宜的温度和光照条件下, 如水体藻类特别是蓝藻类多见于光照充足和温度较高的夏季, 水温大约在 25~35℃ 之间容易暴发, 温度在 20℃ 以下时, 一般发生蓝藻“水华”现象较少。

1.2.5 生态系统结构

淡水生态系统发育的基本模式, 是从贫营养到富营养和由水体到陆地的过程。水库形成初期, 营养物含量较低, 常常仅有一些浮游生物, 随着外源物质的输入, 水库中有机物质含量增高, 并出现库岸沉积物, 进而水生高等植物慢慢发展起来, 水生昆虫、环节动物、鱼类等多种动物陆续迁入。随着时间的推移, 水底沉积物不断增多, 致使沿岸带植物逐渐向水库中心发展。

富营养化的发生与水体食物网结构的变化密不可分。水生生态系统中以食物关系为基础构成的食物网, 作为系统中生源要素迁移、转化过程中的主要生物驱动力, 一直是人们关注的焦点。Pomeroy^② 发现了原生动物对细菌的捕食作用, 首次强调了微型浮游生物在水生食物网中的重要性, 并与生源要素在沉积物和水体中的转化行为相联系。水库由于受人为干扰和影响较为严重, 生态环境条件波动大、快而无规律, 尤其在相邻两次大的扰动事件期间, 水库中的生物常缺乏足够的时间进行种群的生长和繁殖, 以维持和扩充种群。水库中物种迁入—灭绝过程快, 生物多样性相对比较低。Straskraba^③ 分析世界各地的水库时发现, 年平均滞留时间对水库的水动力学、化学与生物过程有直接的相关性。首先滞留时间影响水库湖泊区的分层, 当水库的滞留时间小于 10 天时, 水库难以分层; 要出现明显分层, 水力滞留时间要大于 100 天。当入库水流化学物质浓度维持不变时, 该物质负荷量随滞留时间增加而减少满足指数函数。滞留时间对水生生物的影响直接表现在水生生物种群的动态, 水库的水力滞留时间的长短决定了水库中浮游动物种群能否维持。滞留时间太短, 浮

① 李锦秀, 杜斌, 孙以兰. 水动力条件对富营养化影响规律探讨[J]. 水利水电技术, 2005(36):15-18.

② L. R. Pomeroy, J. E. Sheldon, W. M. Sheldon et al. Seasonal changes in microbial processes in estuarine and continental shelf waters of the south-eastern USA[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2000, 51(4):415-428.

③ M. Straskraba. Limnological differences between deep valley reservoirs and deep lakes[J]. International Review of Hydrobiology, 1998, 83(S1):1-12.

游动物由于缺乏足够的时间进行繁殖,种群数量难以维持。

水库生态系统往往因外源物质的大量输入而出现非常复杂的情况。大量的营养物质流入水库后,使其并不完整的结构和功能遭到破坏,从而引起水体富营养化。当水库蓄水后,群落发育的第一阶段是生产力高的浮游生物阶段;当储存的有机物质消耗完时,系统就在较低的生产力水平上稳定下来。如果水库周围地区的水土流失不严重,或土壤比较贫瘠,那么这个稳定阶段可以持续一定时期。否则,由于土壤浸没和外源物质的大量输入,群落的发育将会经历一系列的“瞬变阶段”。因大量外源物质的输入(水库蓄水等人为因素)所引起的水体富营养化,是与天然情况下水体富营养化根本不同的。水体的天然富营养化,是在系统内生物学过程起主导作用的情况下所产生的,其变化过程是渐进的和漫长的,反映了生态演替的正常趋向。而人为的水体富营养化,则是在强大的外部力量的影响下所产生的;由于系统内的生物学过程受到严重的干扰,因而生态演替的正常趋向发生逆转,更容易产生富营养化。

1.3 国内外湖库富营养化状况

1.3.1 国外湖库富营养化状况

近些年来世界各国普遍重视湖泊环境的演变,来自联合国环境规划署(UNEP)的一项水体富营养化调查结果表明:在全球范围内 30%~40%的湖泊和水库遭受不同程度影响,尤其是在气候干燥地区,水体富营养化情况严重。

在欧洲,统计的 96 个湖泊中有 80%不同程度地受到氮、磷的污染,呈现出富营养化状态。如西班牙的 800 座水库中,至少有 1/3 是处于重富营养化状态。

在南美、南非、墨西哥及其他一些地方都有水库严重富营养化的报道,加拿大湖泊众多,发生富营养化的湖泊则主要集中在加拿大南部人口稠密地区,其大部分湖泊(约 3/4)处于富营养状态。在北美洲最受人关注的五大湖泊中,苏必利湖水水质最好,属贫营养湖泊,休伦湖和密执安湖处于中营养状态,而伊利湖和安大略湖则水质相对较差,属富营养型湖。亚洲湖库水质南北差异较大,北部湖泊水质较好,而南部湖泊水质较差;亚洲湖泊水质的主要特点是水中氮、磷含量偏高(污染贡献率多数占 30%以上)。亚洲南部大部分湖泊富营养化问题突出,适宜的自然条件和湖中营养盐容易引起水华。此外,亚洲大部分城市湖泊接受生活污水较多,高锰酸盐指数(COD_{Mn})和生化需氧量(BOD)均超标严重。

1.3.2 国内湖库富营养化状况

目前在我国 131 个主要湖泊中,已达富营养程度的湖泊有 67 个,占 51.2%。在五大淡水湖中,太湖、洪泽湖、巢湖已达富营养程度,鄱阳湖、洞庭湖目前虽维持中营养水平,但磷、氮含量偏高,正处于向富营养过渡阶段。

根据王孟,马经安等人多年以来的调查结果表明,富营养化湖泊个数占调查湖泊的比例由 20 世纪 70 年代末至 80 年代后期的 41%发展到 80 年代后期 61%,至 20 世纪 90 年代后期又上升到 77%。近十年来,由于各级政府的高度重视,国家投入了大量的人力与物力,水体富营养化防治力度不断加大,治理工作取得了一定的进展,到 2010 年富营养化湖泊比例下降到 53.8%。总体来说,富营养化的发展趋势仍然十分严峻(图 1-2)。

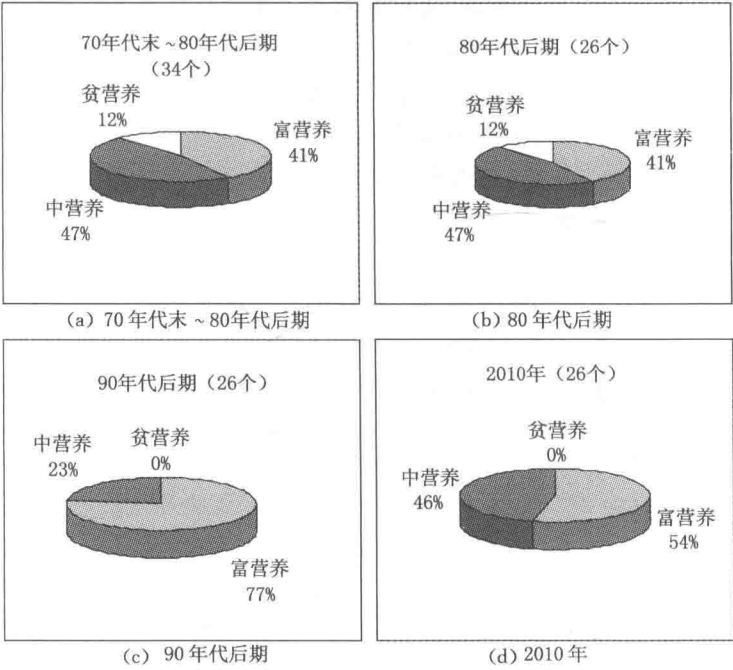


图 1-2 我国湖库富营养化发展趋势

孟红明等^①利用以 2001~2004 年度各流域监测资料对我国 135 座代表性水库进行营养状态调查和评价,被调查的 135 座水库总库容约为 1 423.1 亿 m³。其中,38 座水库处于贫营养型,库容约达 251.1 亿 m³,占评价总库容的 17.6%;40 座水库处于中营养型,库容为 646 亿 m³,占评价总库容 45.4%;57 座水库处于富营养型,库容为 526 亿 m³,占评价总库容 37%。中富营养型水库数量及其库容比例在大、中、小型水库中均处主导地位(表 1-1)。

表 1-1 我国水库营养状态评价结果

营养状态	小型水库				中型水库				大型水库			
	贫	中	富	合计	贫	中	富	合计	贫	中	富	合计
水库数量/个	2	3	6	11	13	21	38	72	23	16	13	52
所占比例/%	1.48	2.22	4.44	8.15	9.63	15.56	28.15	53.33	17.04	11.85	9.63	38.52
库容/亿 m ³	0.00	0.12	0.36	0.47	3.70	5.40	10.20	19.30	247.5	640.5	515.4	1403.3
所占比例/%	0.00	0.01	0.03	0.03	0.3	0.4	0.7	1.4	17.4	45.0	36.2	98.6

根据《2010 年中国环境状况公报》,在监测的 9 座大型水库中,密云水库(北京)为Ⅱ类水质,千岛湖(浙江)和董铺水库(安徽)为Ⅲ类水质,丹江口水库(湖北、河南)和于桥水库(天津)为Ⅳ类水质,松花湖(吉林)为Ⅴ类水质,门楼水库(山东)、大伙房水库(辽宁)和崂山水库(山东)为劣Ⅴ类水质。各水库主要污染指标为总氮。其中崂山水库为轻度富营养状态,松花湖、于桥水库、董铺水库、大伙房水库的营养状态接近富营养化标准,都达到 45 以上,其他

① 孟红明,张振克.我国主要水库富营养化现状评价[J].河南师范大学学报(自然科学版).2007(02):133-136.

四座水库处于 33.2~37.8 之间,属于中营养状态(图 1-3)。根据《2011 年中国环境状况公报》,于桥水库、大伙房水库、和松花湖的营养指数上升,都超过了富营养化的标准,国内水库富营养化情势更加严峻。

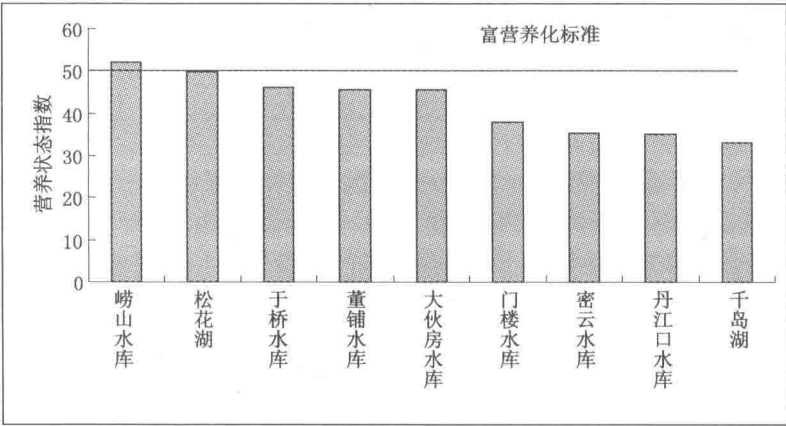


图 1-3 2010 年国控重点水库营养状态

1.4 富营养化问题研究进展

目前,大多数研究者都将富营养化问题的研究重心放在天然湖泊或是运行多年的成熟水库上,如美国的五大湖,日本的霞浦湖和琵琶湖,欧洲的巴拉顿湖、卢加诺湖,国内的“三湖”巢湖、太湖和滇池都是主要的研究对象,围绕富营养化机理、评价、预测和控制展开了一系列的理论和实践研究,取得了大量的研究成果,对解决水环境水生态问题作出了重大的贡献。

1.4.1 水体富营养化机理

20 世纪初,水体富营养化问题引起了生态学家、湖沼学家的注意,同时也得到一些国际组织、国家政府及社会各界人士的关注与重视。

贫营养和富营养的概念最早是由罗曼(Naumann)于 1919 年引入湖泊学中的,并根据浮游植物量的多少和湖水的浑浊程度,把湖泊分为贫营养型和富营养(表 1-2),进而提出了比较完善的湖泊的营养类型的标准。

表 1-2 贫营养湖泊与富营养湖泊的特征比较

项目	贫营养湖泊	富营养湖泊
营养物质	贫乏	丰富
透明度	透明	浑浊
水色	蓝色或绿色	绿色或黄色
生物种类	繁多	单一
浮游藻类	稀少,以硅藻为主	很多,以蓝绿藻为主
溶解氧	全水层接近饱和	通常表水层饱和,下水层显著减少,严重时甚至呈厌氧状态

续表 1-2

项目	贫营养湖泊	富营养湖泊
特征性鱼类	鲑鱼等冷水鱼类	鲤鱼等热水鱼类
湖盆形状	湖盆较深	湖盆较浅
底质	有机质少	有机质多
水温	湖水温度较低(冷水)	湖水温度较高(温水)

20 世纪 60 年代末,随着全球出现的海洋和淡水水体富营养化问题的不断加剧,联合国粮农组织(FAO)、联合国教科文组织(UNESCO)、世界卫生组织(WHO)、欧洲经济共同体(EEC)以及经济合作与发展组织(OECD)等众多国际组织以及世界各国都相继开始了富营养化形成机理及其防治对策的研究,进行了大量的试验、实践与探索。由于富营养化的发生发展包含着一系列物理、化学和生物变化的过程,并与水体化学物理性状、湖泊形态和底质等众多因素有关,其演变过程十分复杂,研究所涉及的学科多种多样,所以当时对富营养化形成机理无法作出科学的解释,研究只停留在探索阶段。研究表明,水体中氮、磷含量直接决定了藻类的繁殖速率,影响水体富营养化进程,是水体富营养化主要控制因子。还有一些研究也表明水体中有机质、维生素类和微有机成分以及锰、铁和钼等微量元素也是影响藻类爆发和水体富营养化发展的重要原因。而按目前已有的研究结果,藻类爆发一般有生物学机制和非生物学机制。生物学机制包括正常和非正常功能的内在因素以及化学调节、生理需求、营养竞争、食物链的生态相关性和外部入侵等外在原因;非生物学因素包括物理因素、化学因素的驱动作用以及抑制作用。

40 多年来,世界各国学者的潜心研究富营养化问题。加拿大的沃伦维德(1968 年),日本的合田建(1970 年)及奥地利的列夫勒(1968 年)等人在富营养化机理研究方面作出了杰出贡献。目前公认的富营养化成因主要是适宜的温度、缓慢的水流流态、相对充足的氮磷等营养盐。对于不同的水域,由于区域地理特性、自然气候条件、水生生态系统和污染特性等诸多差异,会出现不同的富营养化表现症状,但是,影响水体富营养化发生的主要因素基本是一致的,即温度、水流流态和营养盐。

在 20 世纪 50 年代到 60 年代初期,我国专家学者也开始逐渐注意到有关富营养化问题。近 20 年来,我国在富营养化机理研究上也取得了较大的突破。国内学者对东湖、巢湖、太湖、洞庭湖、洪湖、滇池、白洋淀等湖泊的富营养化控制和生态恢复开展了大量的研究。中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室成绩卓著,他们主要在水—沉积物系统方向上取得进展,研究分别从营养元素循环、生物大分子降解过程和铁—锰—硫体系的氧化还原变化等角度对云贵高原不同部位湖泊的沉积物—水系统进行了研究。结果表明,湖泊沉积物—水界面存在“活性有机质分解—溶解营养盐释放—浮游生物吸收—活性有机质沉降”的快速循环,以促成富营养湖泊的高生产力水平;沉积物中生物残骸细胞破裂后蛋白质 DNA/RNA 降解导致的氮—磷差异性释放与微生物作用存在耦合关系;由于铁—锰—硫的微生物作用差异,沉积物早期成岩氧化还原序列变化对营养元素生物地球化学行为起着控制作用。陈德辉等^①以 Tilman 提出的“资源竞争机制学说”为依据,研究了微囊藻栅藻

^① 陈德辉,等.微囊藻栅藻资源竞争的动力学过程[J].环境科学学报,2000,20(3):349-354.

资源竞争的动力学过程,结果表明:在光强为 10.0~17.1 EE 和磷浓度为 3.10~20.0 g/mol 的范围内,微囊藻的生长率大于栅藻的生长率。说明磷的增加是微囊藻成为水华的充分条件,但不是必要条件,至少低光强是一个重要的作用因子。

饶钦止、刘建康等^{①②}在湖泊综合调查和水生生物的专题研究中,曾对湖泊的营养类型、浮游植物群落生态学的主要变化、消灭“湖靛”的方法等方面开展了探索性调查研究。在长江中下游湖区湖泊富营养化的营养盐的来源、富营养化的发生机制和控制技术等领域,王圣瑞等^③研究了长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征;秦伯强^④则通过对长江中下游浅水湖泊的分析,总结出了要控制浅水湖泊富营养化,除了进行外源控制之外,还必须进行内源的治理,治理内源营养盐的有效途径是水生植被的恢复。在对内源营养盐的形态、释放模式、影响因素、转化机理和控制技术方面,金相灿等^⑤对湖泊沉积物中磷的吸收以及影响湖底水土界面上磷的分布和摄入的因素做了一定的研究;张运林,秦伯强等^⑥以太湖为例,在野外调查观测与实验室试验分析的基础上,分析了大型浅水湖泊沉积物悬浮的动力机制,并提出了其内源释放的一般性模式。在外源特别是农业面源的氮、磷营养盐在进入湖泊水体之前的迁移、转化规律方面,席北斗^⑦的研究结果表明,在不同的 pH 条件下,沟渠沉积物对农田排水沟渠中氮、磷的截留是不同的,其总体趋势基本是截留量随着 pH 值的增加而上升;翟丽华^⑧以杭嘉湖流域为例,通过试验,研究了沟渠沉积物对氮、磷的吸附特征及 pH 值大小对吸附能力的影响。此外,许多学者对我国典型富营养化湖泊的营养盐的来源、富营养化的发生机理、限制因子、影响因素和调控策略等方面做了卓有成效的研究。如谢锋等^⑨利用灰色聚类法对五里湖湖滨带进行富营养化评价,研究结果表明,五里湖湖滨带处于富营养状态,磷是其富营养化的限制性因子。秦伯强,范成新等^⑩则从总体上分析了太湖的水环境状况,指出非点源污染是其主要的污染源。李一平等^⑪通过建立数学模型对太湖富营养化控制机理进行了研究。

上述研究成果在探索富营养化机理上具有重要学术价值。湖库富营养化问题不是一个简单的水体污染问题,而是生态系统失调问题,是生态系统的结构功能在人类活动的干预下发生了重大变化之后出现的一种灾害。尽管国内外在水体富营养化机理的研究上开展了大量工作,也不断取得新成果,但离真正揭示富营养化发生机理还为时尚早,对于富营养化机

① 饶钦止,章宗涉.武汉东湖浮游植物的演变(1956~1975年)和富营养化问题[J].水生生物学集刊,1980(1):1-17.

② 刘建康,黄祥飞.东湖生态学研究概况[J].环境科学,1997(1):51-53.

③ 王圣瑞,金相灿,赵海超,等.长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征[J].环境科学,2005(03):38-43.

④ 秦伯强.长江中下游湖泊富营养化发生机制与控制对策[J].中国科学院院刊,2007(6):503-505.

⑤ 郭万喜,张鹏,金相灿,等.上覆水中磷质量浓度对磷在青萍—上覆水—沉积物中分配的影响[J].环境科学研究,2006(06):64-67.

⑥ 张运林,秦伯强.太湖水环境的演变研究[J].海洋湖沼通报,2001(02):8-15.

⑦ 席北斗,徐红红,翟丽华,等.pH对沟渠沉积物截留农田排水沟渠中氮、磷的影响研究[J].环境污染与防治,2007(07):490-494.

⑧ 翟丽华,刘鸿亮,席北斗,等.杭嘉湖流域某源头沟渠沉积物氮及磷的吸附[J].清华大学学报(自然科学版),2009(03):373-376.

⑨ 谢锋,张光生,徐红梅,等.五里湖湖滨带富营养化评价[J].环境科学与技术,2008(01):133-135.

⑩ 张路,范成新,池俏俏,等.太湖及其主要入湖河流沉积磷形态分布研究[J].地球化学,2004(04):423-432.

⑪ 李一平,逢勇,丁玲.太湖富营养化控制机理模拟[J].环境科学与技术,2004(03):1-3.