J. Lake Sci.(湖泊科学),2010,**22**(2):151-160
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn
© 2010 by *Journal of Lake Sciences*

中国水库生态学研究的回顾与展望*

韩博平[1,2]
(1:暨南大学水生生物研究所,广州 510632)
(2:热带亚热带水生态工程教育部工程研究中心,广州 510632)

摘　要:水库是通过人工筑坝形成的水体,其早期功能主要是防洪、发电、灌溉和航运等,但随着全球水资源供需矛盾的加剧,水库供水成为缓解供水压力的最主要途径.水坝是人类影响地球表面水体最重要的工程建筑,筑坝修建水库利用水资源对全球水环境系统产生了巨大的影响.中国是水资源短缺的国家,水库供水在国民经济发展中发挥着重要作用,大量水库的建成也对我国水环境系统产生了多方面的影响.刘建康先生在1955年发表了我国水库生态学研究的第一篇论文,揭开了我国水库生态学研究的序幕.我国水库生态学大致分为三个阶段,1955－1975年的起步阶段、1976－2000年以水库渔业生产为目标的研究阶段和2001年至今以水库水质管理为目标的研究阶段.当前,水质、水质模拟、富营养化、环境容量和生态调度等已成水库生态学研究中的关键词.我国水库研究主要集中在珠江流域和长江流域,以大型供水水库为对象.在水利学科领域,有大量有关水库水文、水动力学和调度的研究论文,这些工作还未能被以生物和化学为研究基础的生态或环境科学的学者所重视.多数以水库为对象的生态学研究还没有很好地体现水库作为人工湖泊的特殊性.近10年来,中国水库生态学经历了从任务导向到学科导向的生态学研究过渡,有不断增加学科交流的趋势.有理由相信,作为水库大国,中国水库生态学和湖沼学今后将会有一很大的发展,并对我国淡水生态学和湖沼学作出重要的贡献.
关键词:水库;生态学;渔业;水质管理;湖沼学

Reservoir ecology and limnology in China: a retrospective comment

HAN Boping[1,2]
(1: *Institute of Hydrobiology*, *Jinan University*, *Guangzhou* 510632, *P. R. China*)
(2: *Ecological Engineering*, *Ministry of Education*, *Jinan University*, *Guangzhou* 510632, *P. R. China*)

Abstract: Reservoirs are constructed by damming a river on an impermeable site usually with a channeled river water supply. At the early historical period, the reservoirs were mainly built for flow or flooding control, power generation, irrigation and navigation. However, these reservoirs have been used to store water to meet the increasing demand of freshwater supply. As one special type of artificial structures, a huge mount of reservoirs were built so that they have largely modified water cycling system and its ecological functions in our planet. China is not rich in fresh water, especially water pollution leading to total limiting capacity of water supply even in the Yangtze River and Pearl River catchments. Water supply by reservoirs has strongly supported a rapid social and economic development in the last 30 years in the country. In 1955, Dr. Liu Jiankang published the first ecological paper of reservoir organisms for fishery resource in *Acta Hydrobiologica Sinica*, initiating the research of reservoir ecology or biological limnology in China. Historically, the reservoir ecology has developed over three distinct stages. From 1955 to 1975, it slowly and arduously started to investigate aquatic organisms for fishery use. From 1976 to 2000, most reservoirs were intensively used for fish culture, the fish production nationally improved animal protein supply. However, water deterioration and degradation of ecological functions resulted in decrease in fish production. Rapid increase in water supply finally leaded to appearance of the third stage highlighting management of reservoir water quality since 2001. Water quality, eutrophication, environmental capacity and ecological regulation of hydrodynamics became key words in newly published literatures in the study of reservoir. Most publications of reservoirs focused on large reservoirs for water supply in Yangtze River and Pearl River catchments. There have existed many researches of hydrological and hydrodynamics in the aspect of water resource, but not being widely shared and cited by reservoir ecologists yet. Many re-

* 国家自然科学基金项目(U0733007)资助.2009－12－20收稿;2009－12－30收修改稿.韩博平,男,1965年生,博士,教授;E-mail:tbphan@jnu.edu.cn.

searches were still descriptive instead of experimental studies based on limnological hypotheses, but slowly changing. Regarding the huge national demand in management of water quality and ecological protection, however, the prosperous future of reservoir ecology and limnology can be expected in China.

Keywords: Reservoir; ecology; fishery; water quality management; limnology

1 我国开展水库生态学研究的重要性

水库是由人工筑坝形成的水体,以大坝为标志的水库主要在二战以后兴建,水库的早期功能主要是防洪、发电、灌溉和航运等[1-2]. 建筑水坝是人类利用工程手段来调节和利用水资源的主要方式. 水库已成为人类影响地球表面水体最重要的工程,遍布于世界各地,特别在自然湖泊较少的地区. 水库是人类活动中最壮观的水利工程,通过水库利用水资源所产生的社会效益是空前的. 我国作为一个农业大国,解放后水利建设成为国家主要的建设内容之一. 我国是世界上水库数量最多的国家,15m 以上的高坝水库占全球的 46%,拥有世界上最大的水库水利工程——三峡水库工程. 至 2002 年底,已建成水库 85288 座,其中大型 487 座、中型 2955 座,总库容 $5594 \times 10^8 m^3$,为自然湖泊水量的两倍多;水库的调水在我国的工农业生产及人民生活中起着举足轻重的作用. 我国水能资源总贮量 $6.76 \times 10^8 kW$,居世界第一,相应年发电量可达 $6.02 \times 10^{12} kWh$,占世界总量的 1/6. 截至 2000 年底,我国水电总装机已达 $7935 \times 10^4 kW$,占全国总装机的 24.8%,居世界第二位,水库发电大大缓解了我国面临的能源短缺. 2002 年,我国建成水库水面 $230 \times 10^4 hm^2$,可养殖水面 $188 \times 10^4 hm^2$,占到淡水总水面的 40% ;水库渔业总产量 $184 \times 10^4 t$,占淡水渔业总产量的 10%,是我国动物蛋白质的重要来源. 水库灌溉是我国农业发展的主要支柱,维持了我国农业经济发展的稳定[3].

改革开放以来,随着我国社会和经济的高速发展以及人为活动的加剧,污染排放增加,河流污染相对严重,供水水质退化较为明显. 在很多省份,水库成为了主要的供水水源,水库功能由发电、防洪转向供水也已成为世界性的趋势. 水利部对水库资源的保护和合理利用的转型十分重视,是“工程水利”向“资源水利”转向的重要体现[4]. 我国是水资源短缺的国家,城市供水越来越依赖于水库供水. 在我国北方地区,资源性缺水严重,水库调水和蓄水对缓解城市供水矛盾起到重要作用,如北京和天津等重要城市的供水水源主要分别来自密云水库和于桥水库等. 在我国南方,河流和湖泊严重退化(如太湖、巢湖、滇池、淮河等),水质性缺水问题严重,加剧了对水库供水的依赖,特别是我国东部的沿海城市和省份. 水利部环境监测报告的数据显示,近 10 年来我国水库水质有明显下降,有 1/3 重要供水水库中达到富营养化水平. 因水质退化,官厅水库已退出向北京供水;一些重要大型供水水库先后发生了蓝藻水华. 在 2007 年太湖蓝藻水华事件后,我国政府对供水水源地的水质管理与生态保护给予了高度重视. 水库作为一种新型的水源地,在全球范围内成为重要的供水水体的时间较短,在公众的意识中水库生态保护还较为模糊,这种现象在我国及其它发展中国家尤其突出. 从我国水库数量及其重要性来看,我国已发表的水库相关研究论文的数量在三大淡水水体(湖泊、水库和河流)中研究论文的比例极不相称,说明我国科研人员投入该领域的力量相对较少,对许多重要水库的生态环境缺少基本的数据和认识. 随着我国国民经济和人口的进一步增长,人类活动加剧了对水库这类水体流域和水面的进一步开发利用. 在全球变暖的大背景下,如何应对人类活动对水库生态环境的影响,保护和维持水库生态系统健康,持续发挥水库在国民经济发展中的支撑作用,系统地开展我国水库生态学研究,了解和掌握水库生态系统动态规律,形成我国水库管理方法,已成为我国今后可持续发展决策的重大科技需求.

2 水库生态系统的特征

2.1 水库类型与主要特征

在国际上,为区分于小型的山塘,水库是指蓄水量大于 $10^6 m^3$ 具有明显河流来水特征的蓄水水体,大坝是水库的标志[1]. 大坝分为土坝和混凝土坝,大型深水水库的大坝主要为混凝土坝,能承受巨大的水压. 水库是一种介于河流和湖泊间的半人工半自然水体,库容与水位的关系决定了对水库水量的调节与利用(图 1). 根据水库容量,水库划分为大型、中型和小型水库,但不同的国家和地区有不同的划分标准. 在欧美地区,小于 $10^8 m^3$ 为小型水库,大于 $10^9 m^3$ 为大型水库,介于两者之间的水库为中型水库[1]. 在我国,小于

$10^7 m^3$ 为小型水库，大于 $10^8 m^3$ 为大型水库. 根据水流的特点，水库也分为河道型水库、平原型水库和山谷型水库. 根据来水的性质，水库以可以分为抽水型与非抽水型水库. 抽水水库通过人为抽水增加水库的蓄水量，抽水水库是一类特殊的水库，在英国等海岛型国家和地区为主要的供水水源地. 这类水库的来水时间与来水水量不同于其它水库，水库的水动力学和运行管理模式也不同. 随着我国沿海地区经济和社会的高速发展，多数供水能力不足的水库，会通过抽水运行增加供水能力，抽水型水库的数量还会进一步增加. 在污染和供水水量不足的双重压力下，认识抽水水库的水环境特点，加强水库水质的管理就更为重要[5].

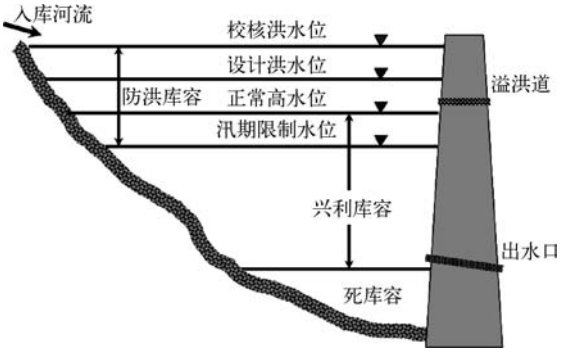


图 1 水库水位与库容利用[6]

Fig. 1 Water level and its corresponding volume described in a vertical section of a reservoir

水库是一种半人工半自然的水体类型，由于对蓄水量的要求，水库水面面积与流域面积之比一般在1∶20 到 1∶100之间，远大于同面积的天然湖泊，从而使流域特征（径流过程及生物地球化学要素）对水库生态系统的影响更为剧烈[7]. 水位的变化与水库功能和调水模式有关，水库水量受人为调节，输出水流的位置有多种选择. 因防洪和调蓄的影响，水库水位波动较大，水生高等植物难得到较好的发育和发展. 在生物多样性上，水库远低于天然湖泊. 水库通常修建于河流域的上游，库形狭长，沿河道方向上有明显的坡度，水深的最深处位于大坝处. 从入库河流到大坝处，水库水质与浮游生物群落的组成上具有明显的空间异质性. 在水平方向上，明显地分为河流区（riverine zone）、过渡区（transition zone）和湖泊区（lacustrine zone）. 因此，水库作为一种特殊的生态系统类型，具有河流与湖泊的杂合特性. 湖沼学家 Wetzel 在国际第一本水库湖沼学著作《Reservoir limnology：ecological perspective》的最后一章中，系统地对水库营养循环与生态系统的特点进行了总结[8]. 水库与湖泊在水动力学过程、营养盐循环和生态系统结构演变等影响水质的关键过程上存在明显的差别，这些差别直接影响水库水质管理方法应用[1,9].

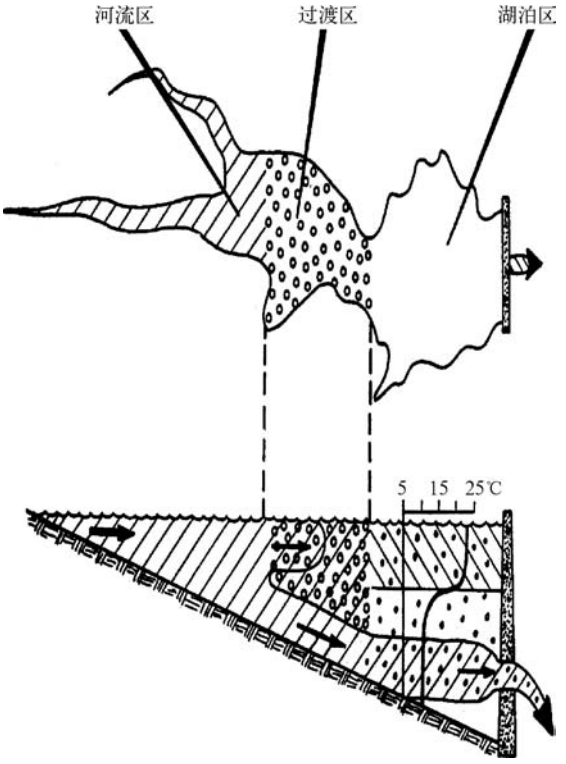


图 2 水库分区（河流区、过渡区和湖泊区）与剖面[9]

Fig. 2 Zoning of surface water and a thermal profile in a typical reservoir

2.2 水库水动力与生态过程的空间格局

水库由水库入水口处到大坝分为三个具有不同生态特征的区域（图 2）. 这三个区域的水域范围是不稳定的，在时空上动态变化的，均可扩展或收缩，主要依赖于入库和出库的流量及其季节动态. 在水动力过程的驱动下，水库水体中发生的物理、化学、生物过程通常存在着明显的梯度[10].

河流区位于水库入水口处，相对较窄，水深也较浅，河流入库后水流流速开始减慢，但仍是水库中流速

最快的区域.入库水流从流域上带来的大量底泥沙,泥沙携带着营养盐、无机和有机颗粒物,导致河流区营养物质的浓度最高.泥沙会明显地降低水体的透明度,水下的光强减弱会限制浮游植物的生长,同时由于混合深度大于真光层深度,浮游植物的生物量也难以快速积累.入库的营养盐能否进入表层水体是由密度异重流的性质所决定.入库河水的密度与库水存在由泥沙和水温导致的密度差,形成异重流,从而形成入库水流会切入水库不同的深度,导致输入的营养物质在不同水层中输送,最终产生不同的生态效应.在河流区,沉淀的悬浮物主要是粒径大的泥沙,粒径小的淤泥和粘土吸附着大量的营养盐被水流输送到过渡区,底部沉积物主要是外源性,有机质含量低.

相对于河流区,过渡区宽且深,流速减缓,这时粒径小的淤泥、粘土和细颗粒有机物大量沉积.过渡区底部沉积物有外源性的,也有内源性的.悬浮物的大量沉积,使过渡区透明度升高,浮游植物生长的受光限制得到改善,同时该区营养盐的含量仍相对比较高,因而该区藻类的生物量及生长率是水库中最高的区域.在夏季,过渡区可出现分层现象,湖下层的区域视水库吞吐流特征而定.水库湖下层低氧区或缺氧区首先在过渡区主河道上出现,然后向河流区和湖泊区两个方向扩展.入库水流形成密度流时,将会改变这种缺氧区的扩展过程.

湖泊区位于水库坝前水域,是水库中最宽最深的区域,夏季容易出现水温垂直分层现象,但不稳定,受水库的出库水流的影响.湖泊区水流流速最慢,粒径更小的颗粒物进一步沉淀,水体透明度在全库最高.由于营养盐一方面在过渡区由细小的悬浮物大量吸附沉积到水库底部,另一方面被浮游植物生长吸收,湖泊区表层水营养盐的浓度较其它两个区低,营养盐靠水体内部循环补充的比例增加,藻类生长主要受营养盐限制,藻类生物量及生长率低于过渡区.湖泊区底部内源性有机沉积物比例比前面两个区高.

2.3 水库生态系统演替

水库是河道上筑坝形成的水体,水库建成初期保留着原来河流的特征.随着水库开始蓄水,水库与原来的河流在生态系统结构与动力学过程上发生明显的分离.水位的增加导致水库水量的增加,入库水流速度下降,水力学滞留时间延长,原有的河道生物群落发生了根本的变化.河道两岸的高等植物消失,大量营底栖生活的动物、植物、微生物也很快成为次优势类群,在敞水区生存的浮游植物、动物与鱼类成为主导生物类群开始向优势类群发展.拦河筑坝后,水库的水文水动力、水质与生物类群的变化,导致水库生态系统的快速发育与演替.水库生态系统的发育与演替主要为三个阶段:营养物质的上涌期、生态过程协调稳定期和水库富营养化及功能丧失期.在水库蓄水后的初期,水体中营养盐浓度和各个营养级的生产力都有提高,这一现象就是所谓的营养状态的上涌.后来的营养水平的下降会持续几年甚至数十年,但会产生较为稳定的生物群落和生产力,表明低营养盐供给率和新的竞争及捕食关系的形成.在这一时期,水库中主要的生态关系形成并协调稳定,成为影响水库生态系统结构的关键要素.Klicava 水库在 1952 – 1955 年开始蓄水后,营养盐上涌得到详细的记录.Straskraba 等基于下行效应解释了上涌期以及后来的生态过程[1].他们认为,食浮游动物的鱼类数量少,对于大型浮游动物的捕食压力低,导致在水库开始蓄水初期大型浮游动物的丰度很高,而大型浮游动物又可以对浮游植物施加牧食压力,从而延迟浮游植物的上涌.这一期间,水库中鱼类群落被适应能力较差的沿岸带鱼类所占据,鱼类的生产力及其大型水生动物的捕食压力很低,这种情况一直持续到湖泊性种类入侵或引进[11].

水库即使进入稳定期,水库生物群落结构的构建方式仍不同于天然湖泊.由于人类对水库水量的高强度利用,防洪、发电和灌溉等导致水库环境条件的快速波动,形成了对生物群落结构的选择压力.在水动力过程变动期间,水库中的生物常缺乏足够的时间完成个体的生长和繁殖,以维持和扩充种群数量.因此,水库中物种迁入——灭绝过程快,生物多样性相对比较低,*r*-选择型生物在水库生物群落中占主导地位,因此浮游生物成为水库生物群落中的基本与优势类群,浮游生物是水库生态系统中起关键作用的结构要素.

富营养化与调蓄及供水功能的丧失期是水库发育与演替的最后一个阶段,是指水库营养盐浓度积累到水体的富营养化水平且出现大量底泥淤积,死库容消失,从而导致水库调蓄功能及供水功能的丧失.在这一阶段,有两个主要生态标志,一是浮游植物的群落结构以蓝藻为主要优势种类,蓝藻生物量占整个浮游植物生物量的比例超过 80%,内源污染是水体中营养物质的重要来源,过渡区和湖泊区的底泥成为厌氧区.

2.4 水库营养盐的来源与循环

水库的外源性氮、磷主要来自入库河流,与降水量和流域面积直接相关[12].无机磷由浮游植物吸收后进入

食物网进行生物循环. 大型的浮游生物，特别是硅藻和浮游动物为磷的生物沉降提供了主要的载体，浮游生物的代谢产物及其死亡后通过微生物的作用向水体释放出可溶性的磷. 磷的入库量直接影响浮游植物的生产力与群落结构. 从入库河口到大坝处，随着流速下降，氮、磷沉降速率增加[13]. 在合适的条件下，底泥中的氮、磷通过释放和再悬浮进入水体. 在水库不同区域，底泥中氮、磷的形态和含量不同，对内源性氮、磷的贡献不同.

水库水的排放将水体中的氮、磷输出，从而可直接控制水体中氮和磷的含量. 水库排水口可以在表层、亚表层和底层；根据水库功能不同，水库的排水量和排放时间不同. 排水口位置和排水时间的可选择性为人为调节控制水动力提供了很大的灵活性[14]. 表层排水可以减少主要以浮游生物形式存在的有机颗粒氮、磷，底层排水则将水底层中的高浓度氮、磷的排出，从而显著减少水体中氮、磷的负荷. 水库排沙清淤的同时，也降低了水体中氮、磷的负荷.

水库的运行调节不仅直接控制和影响水体中氮、磷的负荷水平和分布，水动力过程的改变还间接控制和影响氮、磷的循环[15]. 水库运行调节显著影响水库水动力学过程，改变水力滞留时间和水位. 水力滞留时间的增加会提高水库对营养盐的汇集能力，同时水动力学过程的空间异质性也会导致营养盐在局部区域大量沉积. 水力滞留时间的改变，还导致水库中悬浮颗粒物分布和量的变化，改变水体的光、温条件，影响浮游植物对氮、磷的利用和浮游动物的行为. 水库排水会明显改变水体热分层结构和溶解氧的垂直分布，从而影响水体中氮、磷的沉降与底泥中氮、磷的释放速率.

3 水库生态学理论的形成与发展

水库是一种半自然水体，在库盆形态与水动力学调节上与天然湖泊有很大的差别. 由于世界各国的水库建设时间都很短，对水库生态系统的了解和数据的积累很少，尚未形成较为系统的理论，因此，水库作为一种新型的水体类型，水库生态学和湖沼学有理由成为湖沼学理论创新的重要领域. 从国际上出版和发表水库专著与论文来看，目前水库生态与水质管理主要是结合水库的特点，运用高纬度地区湖泊研究的结果与管理经验[16-18]. 国际上对水库生态系统的研究与水质管理十分重视，已连续召开了 5 届水库生态学与水质管理的国际大会，目前水库生态学的研究相对完善的工作仍主要集中在欧洲的高纬度地区[19-22].

国际上比较重视水库生态学和湖沼学研究的国家主要是那些水库数量多或供水相对重要的国家，如捷克、西班牙，巴西和美国. 捷克和西班牙的研究主要强调以水库水体为核心的生态问题，而美国更关注水库作为流域的一部分，同时考虑水库利用对河流的影响. 捷克学者在水库生态学与湖沼学领域开展的工作较早也最为系统，捷克科学院水生生物研究所是国际上主要以水库为对象的研究机构，对水库生态学发展作出了重要的贡献，同时在基础生态学与湖沼学领域也有重大的贡献. 湖沼学大师 Hrbacek J. 领导的研究所在 20 世纪 60 年代对布拉格供水水库 Slapy 水库的生态学开展了系统的研究，为水库生态学理论的形成奠定了基础，Slapy 水库生态系统的长期研究也为水库生态学理论发展提供了系统的数据[23-24]. 80 年代后，水库生态学受到世界各地学者和有关组织的重视，特别是美国水质工程学会和学者及西欧学者的重视，亚洲（中国、印度）的学者侧重于水库渔业的研究，以水库为对象的生态学研究经费和研究论文数量有了飞速发展[2]. 1987 年第一届国际水库湖沼学和水质管理大会的召开反映了人们对水库生态学研究重要性的认识. 第一本水库湖沼学著作于 1990 年由美国学者 Thorton 及 Kimmel 编写和出版，这标志水库生态学（湖沼学）作为现代湖沼学一个相对独立的学科领域的出现，水库生态学也进入一个快速发展阶段. Straskraba 等编写的水库水质管理一书，作为国际湖泊委员会出版的湖泊管理手册系列中的一本[9]，将国际上已初步形成的水库特征性理论集成并指导水库水质管理，对推动全球水库水质管理起到积极的作用.

水库生态学的核心问题有哪些？国际学术界一直在讨论这一问题. 1998 年在巴西召开了水库生态学前沿研讨会，会议同时邀请国际上基础湖沼学研究的权威参与讨论，会后出版了文集《Theoretical reservoir ecology and its applications》，该文集反映了水库生态学的主要的科学问题[25]. 当前国际上水库生态学的研究主要在两个方面开展，一是将水库作为一种特殊水体类型进行研究来如何丰富经典的基本生态学和湖沼学，二是以水库特点为基础的研究解水库生态管理中存在的问题[26-28]. 捷克科学院水生生物研究所的研究基本代表了当前水库生态学研究的主要方向[29-31]. 值得注意的是，水库作为新建的水体类型，与天然湖泊的比较生态学研究一直受到关注，而水库在区域生物多样性形成以及在对全球变化的响应中的作用正成为水库生

态学重要的研究方向[32-36]. 全球气候变化对水温和入库径流会产生直接影响,从而将流域内的人类活动耦合起来,显著地改变水库生态系统的过程、结构与功能[37].

4 我国水库生态学研究历史回顾

我国是水库大国,对水库生态学的研究主要受国情的约束和影响. 水库生态学研究明显地为分成三个阶段:1955－1975年的起步阶段,1976－2000 年的面向水库养殖的发展阶段和 2000 年后面向水库水质管理的研究阶段. 1955 年,我国淡水生态学主要奠基人刘建康先生在《水生生物学集刊》上发表了我国第一篇水库生态学的论文. 该论文结合苏联科学家的经验与方法,对淮河山谷水库的水生生物与渔业资源利用条件进行了调查与分析[38]. 该论文的研究内容与目的反映了我国当时国家建设与发展的需要. 随后,伍献文和苏联学者波鲁茨基、曹文宣等开展了三峡水库、丹江口水库、偏窗子水库等库区的水生生物调查,这些研究工作的目的也是分析渔业资源状况[39-41]. 在 1960－1975 年期间,我国水库生态学的研究几乎是空白. 1976 年后,国家建设进入新的历史时期,水库生态学研究得到发展. 1976－2000 年,我国水库生态学的研究主要围绕如何提高水库生产力,增加水库放养和网箱养殖的产量[42]. 作为我国水库建设与管理的主要行政职能部门,水利部出台了多个旨在推动水库养殖增加我国鱼类蛋白质数量的政策和文件,并在各省的水利厅设立相关的单位来执行推动,我国的高校和科研究所也积极参与. 在这一阶段,中国科学院水生生物研究所专门成立了水库渔业研究室,后独立成为水利部/中国科学院协管的水库渔业研究所. 我国高校中的华中农业大学、青岛海洋学院(中国海洋大学)和大连水产学院等在我国水库渔业生态学中发挥了重要的作用,并形成了我国水库的渔业生产与管理模式[43-44]. 胡传林和熊邦喜等[45-46]回顾了我国水库渔业养殖的发展并对存在的问题进行分析. 当时已有不少大型水库出现了产量下降的趋势,水库养殖的环境容量开始被重视. 李德尚等开展了系统的围隔实验,提供了水库水面网箱的养殖容量和水面容量及其计算方法[47]. 1997 年第三届水库湖沼学与水质管理大会在捷克召开,我国水库生态学相关学者参加了这大会,这也是我国学者第一次参加这样的会议. 这次会议对到会的中国学者影响很大,他们对如何处理水库生态保护与水库渔业的关系有了全新的认识.

2000 年后,我国水库研究的论文主题发生根本性的变化,重视水库生态系统系统概念和水质管理成为多数论文的主题词. 林秋奇和韩博平发表基于国际上两本水库主要著作[7,9]的观点和当时的评论性论文,综述了水库生态系统特征与水库水质管理的策略,突出强调了水库的生态特点[10]. 早在 1990 年,《湖泊科学》发表了由水利部水利管理司牛运光撰写的科普知识论文“浅论水库”[48]. 水质管理、富营养化、水污染、水质模型、内源污染等成为 2000 年后我国水库研究论文的主要关键词[49-63].

目前刊登水库生态学研究论文的杂志主要有:《湖泊科学》、《水生生物学报》、《生态学报》、《生态学杂志》、《应用生态学报》、《长江流域资源与环境》等,其它生态或环境类的专业期刊也刊登水库的研究论文. 水库工程的规划、设计、运行和水库水文水动力学是水利科学的重要内容,因此水利科学相关的杂志也是报道水库生态环境研究的重要期刊.《水利学报》创刊以来发表了以水库为标题的论文 157 篇,其中有 10% 左右的论文是关于水生态环境的研究,且侧重以模型为手段的研究,这些论文对了解我国水库水文水动力学过程有重要的参考意义[62-71].

在前面提到的《湖泊科学》等主要刊物中,自 1955 年刘建康先生发表第一篇论文以来,发表论文呈增加趋势,特别是 2000 年以来的增长更明显(图 3),反映了我国水库生态学研究的阶段性和当前学术界的重视,也反映了国家对水库生态保护与研究投入的大幅度增加. 我们统计了 6 种期刊发表水库论文的数量,其中《生态学杂志》和《应用生态学报》合在一起统计(图 4). 《湖泊科学》是我国刊登水库生态和环境研究论文最多的期刊. 需要指出的是,作为一个以区域为对象的期刊, 由于三峡大坝的修建和对三峡水库研究的关注,《长江流域资源与环境》也是刊载论文较多的,这反映目前我国长江流域对水库生态保护与研究的重视与活跃的研究.

《湖泊科学》刊登的水库研究论文数量出现了两个峰值(图 4),20 世纪 90 年代中期的大量论文主要是水库渔业生产相关的生态研究,本世纪初发表的论文则主要关注水库生态与水质,并且后一阶段发表论文呈快速增长的趋势. 综合这些数据,说明我国政府和学者重视和关注水库生态学和湖沼学并应用于水质管理与生态系统的保护的大趋势,一方面反映了我国水库在长时间的开发利用后出现了不少问题,另一方面也反映了大家对水库生态退化的认识和改善水质与生态保护的重视.

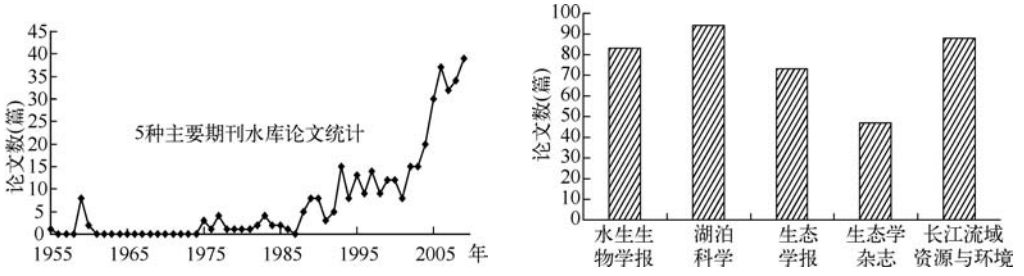


图 3 5 种主要生态学刊物(《湖泊科学》、《水生生物学报》、《生态学报》、《生态学杂志》和《长江流域资源与环境》)每年刊登水库生态学研究论文总数以及各期刊自创刊以来发表论文的总数(其中《生态学杂志》的数量统计包括了《应用生态学报》)

Fig. 3 Research articles published by five principle journals (*Journal of Lake Sciences*, *Acta Hydrobiologica Sinica*, *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, *Acta Ecologica Sinica*, *Chinese Journal of Ecology*; the articles in *Chinese Journal of Ecology* included those by *Chinese Journal of Applied Ecology*)

从已发表论文看,我国水库生态学研究主要由水库重要程度决定的经费投入与科研队伍力量等因素决定. 近 10 年来发表的论文主要集中在长江中下游地区、珠江流域和北京地区,研究的水库主要为大型或重要的供水水源地,如三峡水库、长江中下游水库、密云水库(北京市供水水源)、新安江水库(杭州供水水源)和红枫湖水库(贵阳供水水源)和流溪河水库(广州供水水源). 参与这些水库研究的主要单位有,中国科学院水生生物研究所及长江水利委员会水利工程生态研究所、中国环境科学研究院、重庆地区的高校等(三峡水库),中国科学院南京地理与湖泊研究所等(长江中下游水库)、清华大学、中国水利科学院(密云水库)、杭州环境科学院及杭州的高校等(新安江水库)、中国科学院地球化学研究所(红枫湖水库)和暨南大学(流溪河水库)[72-84]. 广东省是我国水库最多的省份之一,与其它多水库的省份相比,广东省缺少大型的天然湖泊,水库不仅是广东省的主要供水水源,也是保障香港和澳门供水的水源,水库供水在区域经济发展和供水安全保障中具有特殊的作用. 水库生态保护长期受到广东政府和水利行业主管部门的重视,这也导致该地区水库生态学学科与研究队伍的发展[85]. 通过上述主要地区和重要水库的持续研究,我国水库生态学的研究力量得到了发展,对水库生态学的认识也逐步成熟.

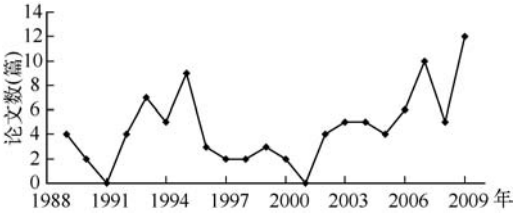


图 4《湖泊科学》创刊以来发表的水库生态学研究论文

Fig. 4 Research articles of reservoir ecology published yearly by *Journal of Lake Sciences*

5 我国水库生态学研究现状与展望

我国是一个大国,气候和地形类型多样化以及气候、土壤、植被和人类活动形式的多样性,我国水库生态及湖沼学现象则更为复杂,水库内部的生物地球化学循环过程与高纬度地区的水库有较大的差别. 我国是水库湖沼学研究开展较早的国家之一,由于国情的需要,水库湖沼学的研究主要围绕水库渔业,基础生态研究较国际现状仍有很大的差距,也远落后于我国的湖泊生态学研究. 目前我国水库生态学和面向水质管理的系统研究十分有限,水库水质管理缺乏系统的理论指导[86]. 我国水库生态学研究主要受研究经费投入所制约,水库生态学研究存在巨大的国家需求潜力还没有得到科研群体的认识. 不同学科队伍之间还缺少主动交流,如水利科学所重视的水库水文水动力学以及泥沙问题还没有被广大水库生态与环境研究人员重视与应用;我国目前以水库生态学为主题的会议还只有一次(《中国水库生态学与水质管理研究》全国编委会,2005,广州). 尽管我国已发表数量不少的水库研究论文,但其中有不少的论文还只能称得上是以水库为对象的研究,没有能够自觉地在实验与观测中体现水库生态系统本身的特殊性. 目前多数水库的研究主要针对环境污染的短期调查与监测,只有个别水库(如广东的流溪河水库和浙江的新安江水库等)设有观测站

并有积累的长期数据.从研究尺度上看,多数研究集中在库区内,以流域为出发点的论文还比较少.当前我国水库生态学研究主要以应用为目标,基础性工作少,系统性不够,水库研究经费资助的不连续性问题突出.

《湖泊科学》是反映我国湖沼学和淡水生态学研究的最重要的学术窗口,在《湖泊科学》发刊词中,施雅风先生强调了对水库生态学研究的重要性.本期专刊以水库生态学为主题,反映了《湖泊科学》对水库这一类新型水体的重视.这次将经审稿通过的自由来稿和特邀征集的水库论文以专刊的形式集中出版,旨在推动我国水库生态学与湖沼学的研究.本专刊的论文在内容上承继了经典水库生态学研究方向,所涉及的水库类型多,反映了我国水库的多样性,如城市湖泊型水库、抽水型水库、新建河道型水库、超大型水库及其库湾等;重视水库底泥污染及底栖动物的研究,关注水库利用出现的新环境问题(核污染与温排水)和水库生态安全评估方法.这些研究内容的变化,反映了我国科研人员已开始从更宽的角度认识水库生态过程,自觉地运用不同学科的新方法.

我国是一个名副其实的水库大国,水库生态系统在区域环境改善、支撑国民经济发展与供水保障方面具有重大的作用,这是世界上任何一个国家所不能相比的,因此水库的生态保护与研究的重要性将需要我们开展系统的基础与应用研究.正如 Lindenmayer 和 Likens 在分析如何开展长期生态观测时指出[87],今后我国水库生态学研究需要加强相关学科的交流与方法集成,重视在理论和假设指导下的水库生态学与湖沼学长期观测,形成有效的理论与方法来指导水质与生态保护的技术发展,满足国家在水库水资源保护与生态建设中的需求.

6 参考文献

[1] Straskraba M, Tundisi JG, Duncan A. State of the art of reservoir limnology and water quality management. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993: 213-288.

[2] 刘建康. 序. 见:韩博平,李 铁,林旭钿主编. 广东省大中型水库富营养化现状与防治对策研究. 北京:科学出版社,2003.

[3] 高而坤. 序. 见:韩博平,石秋池,陈文祥主编. 中国水库生态学与水质管理研究. 北京:科学出版社,2006.

[4] 汪恕诚. 资源水利——人与自然和谐相处. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[5] 韩博平,冯远船,刘正文. 广东省大镜山水库生态学与水质管理研究. 广州:广东省科学技术出版社,2006.

[6] 王红亚,吕明辉. 水文学概论. 北京:北京大学出版社,2007.

[7] Thornton KW, Kimmel BL, Payn FE. Reservoir limnology: Ecological perspectives. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1990.

[8] Wetzel RG. Reservoir ecosystems: Conclusion and speculations. In: Thornton KW, Kimmel BL, Payn FE eds. Reservoir limnology: Ecological perspectives. New York: A Wiley-Innterscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., 1990: 227-238.

[9] Straskraba M, Tundisi JG. Reservoir water quality management. International Environment Committee, 1999: 1-229.

[10] 林秋奇,韩博平. 水库生态系统特征及其在水质管理中的应用. 生态学报,2001,**21**(6): 1034-1040.

[11] Kaff J. Limnology-Inland water ecosystems. New Jerey: Prentice Hall, 2003.

[12] Hart BT, von Dok W, Djuangsih N. Nutrient budget for Saguling reservoir, west java, Indonesia. *Water Research*, 2002, **36**: 2152-2160.

[13] Brzakova M, Hejzlar J, Nedoma J. Phosphorus uptake by suspended and settling seston in a stratified reservoir. *Hydrobiologia*, 2003, **504**: 39-49.

[14] Casamithjana X, Serra T, Colomer J *et al*. Effects of the water withdrawal in the stratification patterns of a reservoir. *Hydrobiologia*, 2003, **504**: 21-28.

[15] Hueftle SJ, Stevens LE. Experimental floods on the limnology of Lake Powell Reservoir, Southwestern USA. *Ecological Application*, 2001, **11**: 644-656.

[16] Ducan A. A review: limnological management and biomanipulation in the London Reservoirs. *Hydrobiologia*, 1990, **200/201**: 541-548.

[17] Kennedy RH. Considerations for establishing nutrient criteria for reservoirs. *Lake and Reservoir Management*, 2001, **173**: 175-187.

[18] Brierley B, Harper D. Ecological principles for management techniques in deeper reservoirs. *Hydrobiologia*, 1999, **395/**

396：335-353.

[19] Hejzlar J, Straskraba M. On the horizontal distribution of limnological variables in Rimov and other stratified Czechoslovak reservoir. *Archives Hydrobiolia Beih Ergebn Limnology*, 1989, **33**: 41-55.

[20] Komarkova J, Hejzlar J. Summer maxima of phytoplankton in the Rimov reservoir in relation to hydrobiologic parameters and phosphorus loading. *International Review of Hydrobiology*, 1996, **136**: 217-236.

[21] Tufford DL, Mckellar HN. Spatial and temporal hydrodynamics and water quality modeling analysis of a large reservoir on the South Carolina (USA). *Ecological Modelling*, 1999, **114**: 137-173.

[22] Han BP, Armengol J, Garcia JC *et al*. The thermal structure of Sau reservoir (NE: Spain). *Ecological Modelling*, 2000, **125**: 109-122.

[23] Ulmann D. Reservoirs as ecosystems. *International Review of Hydrobiology*, 1998, **83**: 13-22.

[24] Hrbacek J. Ecosystems of European man-made lakes. In: Taub FB ed. Lake and reservoirs. Ecosystems of the world. Amsterdam: Elsevier, 1984: 267-290.

[25] Tundisi JG, Straskraba M. Theoretical reservoir ecology and its applications. Sao Carlos: Backhuys Publishers B. V. ,1999.

[26] Sed'a J, Petrusek A, Macháĉek J *et al*. Spatial distribution of the *Daphnia longispina* species complex and other planktonic crustaceans in the heterogeneous environment of canyon-shaped reservoirs. *Journal of Plankton Research*, 2007, **29**(7): 619-628.

[27] Čech M, Kubečka J, Frouzová J *et al*. Impact of flood on distribution of bathypelagic perch fry layer along the longitudinal profile of large canyon-shaped reservoir. *Journal of Fish Biology*, 2007, **70** (4): 1109-1119.

[28] Devetter M, Sed'a J. The relative role of interference competition in regulation of a rotifer community during spring development in a eutrophic reservoir. *International Review of Hydrobiology*, 2008, **93** (1): 31-43.

[29] Betsill RK, van den Avyle MJ. Spatial heterogeneity of reservoir zooplankton: a matter of timing? *Hydrobiologia*, 1994, **277**(1): 63-70.

[30] Guevara G, Lozano P, Reinoso G *et al*. Horizontal and seasonal patterns of tropical zooplankton from the eutrophic Prado Reservoir (Colombia). *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*, 2009, **39**(2): 128-139.

[31] Pinto-Coelho R, Pinel-Alloul B, Méthot G *et al*. Crustacean zooplankton in lakes and reservoirs of temperate and tropical regions: variation with trophic status. *Canadian Journal Fishery Aquatic Sciences*, 2005, **62**(2): 348-361.

[32] Dirnberger J, Threlkeld S. Advective effects of a reservoir flood on zooplankton abundance and dispersion. *Freshwater Biology*,1986, **16**(3): 387-396.

[33] Akopian M, Garnier J, Pourriot R. A large reservoir as a source of zooplankton for the river: structure of the populations and influence of fish predation. *Journal of Plankton Research*, 1999, **21**: 285-297.

[34] Work KA, Gophen M. Factors which affect the abundance of an invasive cladoceran, *Daphnia lumholtzi*, in U. S. reservoirs. *Freshwater Biology*, 1999, **42**: 1-10.

[35] Rahel FJ, Olden JD. Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species. *Conservation Biology*, 2008, **22**(3): 521-533.

[36] Monteith DT, Stoddard JL, Evans CD *et al*. Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry. *Nature*, 2007, **450**: 537-540.

[37] Walling DE. The Impact of global change on erosion and sediment transport by rivers: Current Progress and Future Challenges. In the United Nations World Water Development Report 3, UNESCO. 2009.

[38] 刘建康,朱宁生,王祖熊. 淮河山谷水库的调查及其养鱼的利用. 水生生物学集刊,1955,(1): 45-66.

[39] 波鲁茨基 EB,王乾麟,王士达等. 长江三峡水库库区水生生物调查和渔业利用的规划意见. 水生生物学集刊,1959, (1): 1-32.

[40] 波鲁茨基 EB,伍献文,白国栋等. 丹江口水库库区水生生物调查和渔业利用的意见. 水生生物学集刊,1959, (1): 33-56.

[41] 曹文宣. 偏窗子水库库区水生生物和渔业调查. 水生生物学集刊,1959, (1): 58-72.

[42] 吴恒安,徐泳九. 水库渔业经济评价方法初探. 水利学报,1987, **18**(11): 63-71.

[43] 何志辉,李永函. 清河水库的浮游生物. 水生生物学集刊,1983,**8**(1): 71-84.

[44] 王卫民,谢从新,陈昌福等. 三道河水库浮游生物现状及其鱼产力的估算. 湖泊科学,1994,**6**(1): 46-54.

[45] 胡传林,董方勇. 中国水库渔业的现状与趋势. 湖泊科学,1993,**5**(4): 378-383.

[46] 熊邦喜,李德尚,周春生等. 我国水库综合养鱼的发展前景. 湖泊科学,1994, **6**(1): 78-85.

[47] 李德尚,熊邦喜,李 琪等. 水库对投饵网箱养鱼的负荷力. 水生生物学报, 1994, **18**(3): 223-229.
[48] 牛运光. 浅论水库. 湖泊科学,1990,**2**(1): 85-87.
[49] 邬红娟,郭生练. 水库水文情势与浮游植物群落结构. 水科学进展,2001,**12**(1): 51-55.
[50] 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. 环境科学,2001,**22**(4): 104-107.
[51] 黄真理,李玉梁,李锦秀等. 三峡水库水环境容量计算. 水利学报, 2004,**35**(3): 7-14.
[52] 王 孟,邬红娟,马经安. 长江流域大型水库富营养化特征及成因分析. 长江流域资源与环境,2004,**13**(5): 478-481.
[53] 赵孟绪,韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析. 生态学报,2005,**25**: 1554-1561.
[54] 徐祖信,叶建锋. 前置库技术在水库水源地面源污染控制中的应用. 长江流域资源与环境,2005,**14**(6): 792-795.
[55] 蔡庆华,胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究. 水生生物学,2006,**30**(1): 7-11.
[56] 郑丙辉,张 远,富 国等. 三峡水库营养状态评价标准研究. 环境科学学报,2006,**26**(6): 1022-1030.
[57] 何天容,冯新斌,李仲根等. 季节性缺氧水库甲基汞的产生及其对下游水体的影响. 湖泊科学,2006,**18**(6): 565-571.
[58] 林彰文,顾继光,韩博平. 一个抽水水库的沉积物及其无机磷含量的分布特点. 农业环境科学学报,2006,**25**(3): 776-781.
[59] 艾学山,范文涛. 水库生态调度模型及算法研究. 长江流域资源与环境,2008,**17**(3): 451-455.
[60] 池仕运,彭建华,万成炎等. 湖北省三道河水库底栖动物的初步研究. 湖泊科学,2009,**21**(5): 705-712.
[61] 李若男,陈求稳,蔡德所等. 水库运行对下游河道水环境影响的一维-二维耦合水环境模型. 水利学报,2009,**40**(7): 769-775.
[62] 李景保,常 疆,吕殿青等. 三峡水库调度运行初期荆江与洞庭湖区的水文效应. 地理学报,2009,**64**(11): 1342-1352.
[63] 宁建凤,邹献中,杨少海等. 广东大中型水库底泥重金属含量特征及潜在生态风险评价. 生态学报,2009,**29**(11): 6059-6067.
[64] 范家骅,杜国翰. 水库泥沙问题. 水利学报,1985,**17**(6): 22-29.
[65] 陈小红,叶守泽. 分层水库水温分布的模式识别及随机模拟. 水利学报,1992,**23**(12): 27-33.
[66] 李怀恩. 分层型水库的垂向水温分布公式. 水利学报,1993,**24**(3): 43-50.
[67] 姜乃森,傅玲燕. 中国的水库泥沙淤积问题. 湖泊科学,1997,**9**(1): 1-8.
[68] 韩其为,杨小庆. 我国水库泥沙淤积的研究综述. 中国水利水电科学研究院学报,2003,(3): 169-178.
[69] 邓 云,李 嘉,罗 麟. 水库温差异重流模型的研究. 水利学报,2003,**34**(7): 7-11.
[70] 庄丽榕,潘文斌,魏玉珍. CE-QUAL-W2 模型在福建山仔水库的应用. 湖泊科学,2008,**20**(5): 630-638.
[71] 张士杰,彭文启. 二滩水库水温结构及其影响因素研究. 水利学报,2009,**40**(10): 1254-1258.
[72] 张礼善,冯 添,李建雄. 高州水库的轮虫种群和水质评价. 水生生物学报,1990,**14**(2): 189-193.
[73] 陈永灿,张宝旭,李玉梁. 密云水库垂向水温模型研究. 水利学报,1998,**29**(9): 14-20.
[74] 王雨春,王仕禄,黄荣贵等. 红枫湖、百花湖沉积物中磷的存在形态研究. 矿物学报, 2000,**20**: 273-278.
[75] 胡 韧, 林秋奇,王朝晖等. 广东省典型水库浮游植物组成与分布特征. 生态学报,2002,**22**: 1939-1944.
[76] 林秋奇,胡 韧,韩博平. 流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响. 生态学报,2003,**23**: 2278-2284.
[77] 李共国,虞左明. 千岛湖轮虫群落结构及水质生态学评价. 湖泊科学,2003,**15**(2): 170-176.
[78] 陈文祥,刘家寿,彭建华. 水库生态环境问题初步分析与探讨. 水利渔业,2006,**26**(1): 55-56.
[79] 韩博平,林桂花,钟秀英. 水库蓝藻和蓝藻毒素的分布与检测——广东省典型供水水库研究. 北京:中国环境科学出版社,2006.
[80] 赵帅营,韩博平. 大型深水贫营养水库——新丰江水库浮游动物群落结构分析. 湖泊科学,2007,**19**(3): 305-314.
[81] 徐 杨,常福宣,陈 进等. 水库生态调度研究综述. 长江科学院院报,2008,**25**(6): 33-37.
[82] 黎慧卉,刘丛强,汪福顺等. 猫跳河流域梯级水库磷的夏季变化特征. 长江流域资源与环境,2009,**18**(4): 368-372.
[83] 郑丙辉,王丽婧,龚 斌. 三峡水库上游河流入库面源污染负荷研究. 环境科学研究,2009,**22**(2): 125-131.
[84] 吴挺峰,高 光, 晁建颖等. 基于流域富营养化模型的水库水华主要诱发因素及防治对策. 水利学报,2009,**40**(4): 391-397.
[85] 韩博平,李 铁,林旭钿. 广东省大中型供水水库富营养化现状与防治对策研究. 北京:科学出版社,2003.
[86] 刘建康. 序. 见:韩博平,石秋池,陈文祥主编. 中国水库生态学与水质管理研究. 北京:科学出版社,2006.
[87] Lindenmayer DB, Likens GE. Adaptive monitoring: a new paradigm for long-term research and monitoring. *Trends in Ecology and Evolution*, 2009, **24**(9): 482-487.