

江苏省“十二五”重点出版规划项目

气候变化及人工调控对 大型水库水环境的影响

钱新 王晟 著
李梅 杨珏



南京大学出版社

江苏省“十二五”重点出版规划项目

气候变化及人工调控对 大型水库水环境的影响

钱新 王晟 著
李梅 杨珏



南京大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

气候变化及人工调控对大型水库水环境的影响 / 钱新等著.
—南京: 南京大学出版社, 2015.12
ISBN 978-7-305-13860-7

I . ①气… II . ①钱… III . ①气候变化 - 影响 - 水库
环境 - 水环境 IV . ① P467 ② X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 309606 号

出版发行 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093
出 版 人 金鑫荣

书 名 气候变化及人工调控对大型水库水环境的影响
著 者 钱 新 王 晟 李 梅 杨 珏
责任编辑 蔡文彬 编辑热线 025-83686531

照 排 南京新华丰制版有限公司
印 刷 南京鸿图印务有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 11 字数 231 千
版 次 2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-305-13860-7
定 价 66.00 元

网 址 <http://www.njupco.com>
官方微博 <http://weibo.com/njupco>
官方微信 njupress
销售咨询热线 025-83594756

* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购
图书销售部门联系调换

前言

水库建设是人类开发利用水资源的重要手段。长期以来水库在防洪、发电、供水、灌溉、养殖等各个方面发挥着重要功能，在人类文明的进程中起到举足轻重的作用。维护良好的水库水环境质量是保证社会经济可持续发展的重要前提。

近年来区域气候变化对水环境的影响受到人们的关注。水库所在区域气候的变化，对水库的水温、层间交换、入库径流时空规律等均产生影响，进而可能极大地改变水库水体的浊度、营养盐、溶解氧等水环境特征。在区域气候变化的同时，水库流域人口的快速增长以及工农业的快速发展，水库周边出现水土流失、支流污染、农业面源污染等现实问题，导致入库悬浮物、营养盐以及污染物质大大增加，直接改变了水库的水环境条件，对水库水生态环境不可避免地产生影响。

上述两方面问题导致的水库水环境的改变，可能影响水库水质并加重富营养化程度，最终干扰水库功能的正常发挥，危及到区域的可持续发展。伴随着水库上游人类活动以及森林植被覆盖的减少，水库淤积过程加速，流域营养盐输入增加，其他诸如养殖、工业等污染物输入增加，使得很多水库水质下降，不能满足生产、生活用水要求；同时，许多大型水库的富营养化问题突出，发生了有毒藻类水华暴发的污染事件，严重影响了区域水资源的安全。为了保障水库水质、遏制富营养化进程，科学应对气候变化带来的水库水环境变化，合理运用人工调控手段进行调节，有必要深入地研究气候变化及人工调控对大型水库水环境的影响，弄清水库水环境的变化趋势。并以此为基础，制定水库水环境管理方案。这方面的研究对于加强水库水环境管理，保障区域水资源可持续利用具有重要意义。

本书以华南地区的流溪河水库为主要研究对象，基于观察资料分析和数学模型应用，从区域气候变化和人工调控两个方面系统地研究

了水库水环境的响应。本书共分十一章，第一章主要介绍水库水环境演变的基本过程；第二章介绍区域气候变化对水环境影响的已有研究及成果；第三章介绍水库水质管理及人工调控措施；第四章介绍本书主要采用的水库数学模型；第五章介绍主要研究对象流溪河水库的水环境现状、基本水文特征，以及与现场观测的方法等；第六章基于现场观测资料，分析了流溪河水库的流速、水温分层、密度流、营养盐以及叶绿素 a 等的时空分布；第七章运用流溪河水库模型，对水库的水动力水质时空变化特征，包括水温、浊度、溶解氧、营养盐、叶绿素 a 等，进行了全面的模拟并与实测数据进行验证分析；第八章在分析流溪河水库长期气象、水文资料的基础上，基于区域气温持续上升的场景，利用已建立的流溪河水库水动力-水质-生态动力学模型，模拟不同气象和水文条件对水库水动力过程和水质状态的影响，并分析其内在原因，为区域水资源的长效利用与管理提供数据基础；第九章主要从水库大坝管理的角度，针对不同的水量调度方案和水库出水口位置布置，运用水库模型分析水库的水动力、水质过程的响应以及水质调控作用的效果；第十章选择流溪河水库邻近的湖泊型水库——大沙河水库作为比较研究的对象，通过现场观测和数值模拟，分析两座水库在水动力和水质过程上的差异，以及对人工调度措施不同的响应特征；第十一章在确定流溪河水库半挥发性有机物的基础上，对流溪河水库水体潜在健康风险进行评价，分析了流溪河水库水体有机污染物对藻类的毒性效应，并应用彗星试验进行遗传毒性检测，为进一步评价流溪河水体对水生生物的毒性效应，加强水库水质风险管理提供基础和依据。

本书的研究得到国家自然科学基金委-广东联合基金重点资助项目“热带亚热带水库水质控制的关键过程与调控机制”（编号：U0733007）的支持。研究得到暨南大学水生生物研究所韩博平教授课题组的指导和帮助，在模型构建和应用上得到新西兰怀卡托大学 David P Hamilton 教授在学术上的指导，在现场工作中得到流溪河水库水电站管理部门的大力协助。在本书出版之际，谨表示最诚挚的谢忱。

大型水库水环境研究是一项复杂而长期的任务，本书力求反映水库研究的最新进展，但由于著者水平所限，书中不足之处在所难免，请广大读者批评指正。

钱 新

2015 年 9 月于南京大学

目 录

第一章 水库水环境演变过程	001
1.1 水库水文过程	002
1.2 水库的水动力过程	003
1.3 水库热分层	004
1.4 水库沉积过程	005
1.5 水库的化学过程	006
1.6 水库的生态系统特征	007
1.7 水库面临的主要水环境问题	010
第二章 区域气候变化对水库的影响	012
第三章 水库管理及人工调控措施	018
第四章 水库模型及数值研究方法	023
4.1 水动力模型	024
4.1.1 DYRESM (Dynamic Reservoir Simulation Model, 水库水动力学模型)	024
4.1.2 ELCOM (Estuary and Lake Computer Model, 河口湖泊水动力学模型)	025

4.2	生态动力学模型.....	026
4.3	一维水动力 - 水生态动力学耦合模型的应用.....	028
4.3.1	丹麦深水湖泊 Ravn 氮循环和外源氮削减方案模拟.....	028
4.3.2	浮游动物在以色列 Kinneret 湖的碳、氮、磷循环中作用的研究.....	029
4.3.3	西班牙水库设计中的水质预测研究.....	030
4.4	三维水动力 - 水生态动力学耦合模型的应用.....	030
4.4.1	意大利波河水动力和营养盐输出对北亚德里亚海的影响研究.....	031
4.4.2	韩国大型河道型水库浊度密度流的研究.....	031
4.4.3	澳大利亚天鹅河口蓝藻水华模拟.....	032
第五章	基于水库水环境特征的现场观测方法.....	034
5.1	水库流域概况与水文特征.....	034
5.2	现场观测方法.....	037
第六章	水库现场观测结果与分析.....	039
6.1	水库流速观测.....	039
6.2	季节性分层.....	040
6.3	浊度密度流.....	042
6.4	水体透明度.....	046
6.5	营养盐时空特征和浮游植物演替.....	048
第七章	水动力水质数值模拟.....	052
7.1	模型初始设置.....	052
7.1.1	一维模型初始设置.....	052
7.1.2	三维模型初始设置.....	054
7.2	边界条件设置.....	054
7.2.1	水文、气象条件.....	054

7.2.2	入库河流逐日水温.....	056
7.2.3	入库河流逐日浊度.....	057
7.2.4	入库河流逐日营养盐浓度.....	058
7.3	长期模拟结果分析.....	059
7.3.1	水温模拟结果.....	059
7.3.2	浊度模拟结果.....	061
7.3.3	溶解氧模拟结果.....	063
7.3.4	营养盐模拟结果.....	064
7.3.5	叶绿素 a 模拟结果.....	070
7.4	雨季三维模拟结果与分析.....	071
7.5	本章小结.....	073
第八章	气候变化对水库水环境的影响.....	074
8.1	库区气象、水文条件的长期动态特征.....	074
8.2	气候变化场景设置.....	075
8.3	气象水文因子对水库水动力状态的影响.....	076
8.3.1	水温垂直分布.....	076
8.3.2	水体稳定度.....	077
8.3.3	表层水温.....	079
8.3.4	下泄水温.....	081
8.4	气象水文因子对水库水质状态的影响.....	082
8.4.1	浊度和悬浮物.....	082
8.4.2	营养盐浓度.....	085
8.4.3	溶解氧分布.....	088
8.4.4	叶绿素 a 浓度.....	089
8.5	本章小结.....	093
第九章	人工调控对水库水环境的影响.....	094
9.1	人工调控对水库水位的影响.....	094
9.2	人工调控方案分析.....	096

9.2.1	水量调度模式	096
9.2.2	出水口位置管理	097
9.3	人工调控场景设置	097
9.4	人工调控对水库水动力状态的影响	099
9.4.1	水温垂直分布	099
9.4.2	水体稳定度	100
9.4.3	表层水温	101
9.4.4	下泄水温	102
9.5	人工调控对水库水质状态的影响	104
9.5.1	浊度和悬浮物量	104
9.5.2	营养盐浓度	106
9.5.3	溶解氧分布	109
9.5.4	叶绿素 a 浓度	110
9.6	人工调控对富营养型水库水质的影响	113
9.7	本章小结	117
第十章	河道型与湖泊型水库的水环境特征比较	118
10.1	湖泊型水库的特征	118
10.2	现场监测结果与分析	120
10.2.1	水库水文特征	120
10.2.2	季节性分层	121
10.2.3	营养盐和叶绿素 a 浓度	123
10.3	数值模拟结果	124
10.3.1	模拟条件设置	124
10.3.2	模拟结果与分析	124
10.4	两座水库水环境特征的比较	128
10.4.1	水文、水动力特征	128
10.4.2	水生态、水质特征	129
10.5	本章小结	129

第十一章 水库生态与健康风险评价	131
11.1 水库水体环境影响度评价.....	131
11.1.1 采样点位及水样处理.....	132
11.1.2 SVOCs 定量分析.....	133
11.1.3 环境影响度评价	133
11.2 水体 SVOCs 对斜生栅藻的毒性效应	135
11.2.1 实验方法	135
11.2.2 实验结果与分析	136
11.3 水库水体人体健康风险评价.....	141
11.3.1 采样点位和水样处理.....	141
11.3.2 SVOCs 结果与分析	142
11.3.3 SVOCs 人体健康风险评价	144
11.4 水库水体遗传毒性评价	146
11.4.1 实验方法	149
11.4.2 评价结果	149
参考文献	151

第一章 | 水库水环境演变过程

水库一般定义为拦截洪水、蓄积水资源和调节水流的水利工程建筑物，可以用来灌溉、发电、防洪和发展渔业等。水库通常指在山谷或河流的狭窄处建造拦截河流的水坝而形成的人工湖泊。水库建成后，可起防洪、蓄水灌溉、水资源供给、发电、渔业养殖等作用。

降雨落在河流流域的地表面上，雨水由地面或地下按不同途径流入河槽的水流，称为河川径流。河川径流具有多变性和不重复性，不同的年份与季节径流量都不同。大多数用水部门，例如灌溉、发电、供水、航运等，都要求比较稳定的用水量，用水时间也相对固定。这些要求常常难以与天然来水情况相适应。人们为了解决径流在时间、空间上的重新分配问题，充分开发利用水资源，使之适应用水部门的需求，往往在江河上修建水库工程。水库的兴利作用就是进行河流径流调节，蓄积洪水弥补枯水季节水量不足的状况，使天然来水能在时间、空间上满足用水部门的需求。

人们在防洪区上游河道兴建能调蓄洪水的水库，利用水库库容拦蓄洪水，削减进入下游河道的洪峰流量，达到减免洪水灾害的目的。水库对洪水的调节作用有滞洪和蓄洪两种方式。

滞洪是使洪水在水库中暂时停留，洪峰过后及时排出水库。蓄洪作用指水库在汛期前用水，将水库水位降到水库最低限制水位，则限制水位至溢洪道堰顶高程之间的库容，就能起到蓄洪作用。蓄积在水库中的洪水可在枯水期用于兴利需要。

水库在蓄洪的同时，也延长了水力停留时间。上游来的污染物，如氮、磷营养盐等在库区停留时间增加，由于水流流速的减慢，使得藻类及水生植物生长蔓延，影响水库的水质和水资源的利用。由于水体流动和含沙量的变化，还可能改变水库下游河道的河水流向和冲积

程度,造成河床冲刷、侵蚀,也可能对下游的入湖口或入海口等区域的冲淤平衡产生较大的影响。

近年来,随着经济、社会的发展,城市化进程的加速,城镇用水需求增加很快。水库的主要功能中,作为城镇用水水源地的比重逐年上升。城镇供水成为水库的主要功能后,水库管理的性质也随之发生了转移。原来的蓄洪调洪、发电等主要以水量为对象的管理工作也在发生变化。城镇供水不仅对水量,更重要的是对水库的水质管理提出了较高的要求。

1.1 水库水文过程

水库蓄水量及其变化规律与出库、入库水量有密切关系。出入库水量平衡的变化造成了水库蓄水量和水位的变化。入库水量包括水库表面降水量和流入水库的地表、地下径流量。出库水量包括表面蒸发量,流出水库的地表、地下径流量和工农业自水库的引水量。汇总计算水库水量平衡,可以确定水库蓄水量的变化,评价水库水资源,阐明水库对江河的调蓄能力。水库蓄水量的变化,决定水库水位的升降。在总蓄水量不变的情况下,水库表面定振波、风浪等作用会引起水位以较短的周期发生波动。水库水位资料、水深分布等数据是计算水库蓄水量的依据。

图 1-1 是水库流域降雨和入库流量的关系,可以看出入库流量的峰值滞后于雨量的峰值,这个滞后时间的长短与流域的大小、地表径流的形成过程有关。

从图中还可以看出,河流的浊度随着流量的增加而升高,浊度峰值与流量峰值出现时刻一致。总悬浮物的峰值与波形都与浊度非常相似,说明两者相关度很高。总磷的分析结果表明,其浓度变化与流量或浊度的变化一致。与此相对应,正磷酸盐的浓度与流量或浊度的变化无明显关系,一直保持较低的值。可以认为,洪水季

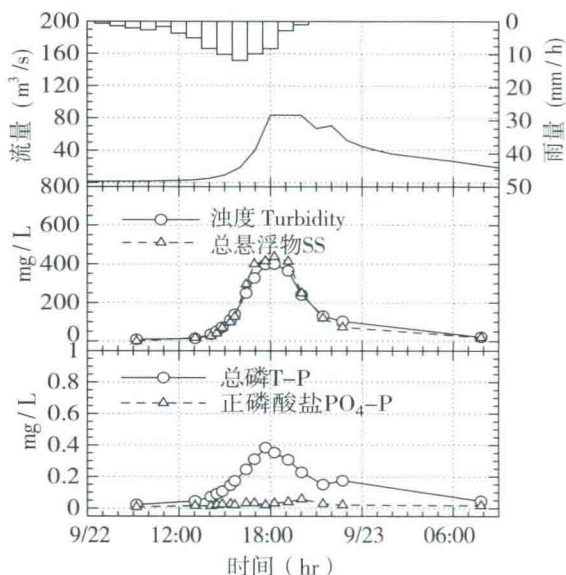


图 1-1 降雨和入库流量、悬浮物和营养盐的变化过程

节流入水库的磷大部分为吸附在泥沙表面的颗粒态磷。

1.2 水库的水动力过程

水库的水动力过程主要包括水库水流的各种运动方式、相互关系及其发生、发展和停息的机制。水库流动有表面流动，也有内部流动；有周期性的流动，也有非周期性的流动。水库流动除受外部因素如表面风场等作用外，还受表面积、深度、水下形态、水温垂直分层结构、泄洪道位置等内部因素的制约。把握水库流动变化规律可以解释泥沙运动、水库冲淤、岸线演变、水物理性质和化学成分变化规律，为水库管理提供资料。

水库流动的研究，以流体动力学、水力学为基础，采取野外观测与室内模型实验相结合的方法，近年来数值模拟方法也得到广泛的应用。

图 1-2 是应用超声波多普勒流速仪在现场监测的水库流速分布和水库三维数值模拟的结果。从下半部分的浊度分布图可以看出，含高浊度的水流从左侧的流入地点开始，最初的流动呈现底层密度流的特征，沿水库底坡流动，从 A3 位置离开坡底，在深度 10m~20m 附近沿水平方向流向水库下游。下游的 A1 地点附近流速减小，在靠近大坝一侧出现了逆流。此时含沙水流已到达最下游。因此，可以认为逆流是因为含沙水流到达

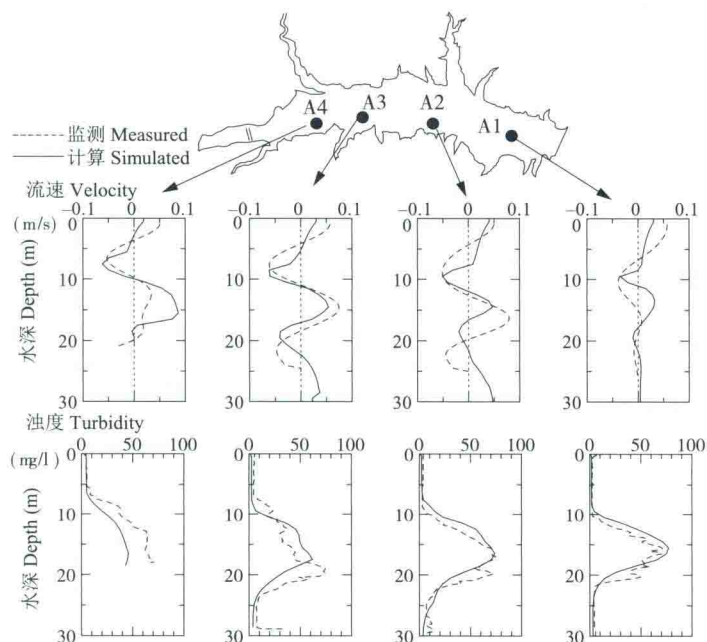


图 1-2 水库的流速分布和相应的浊度分布

坝体后反射回来而造成的。从浊度分布与流速的对应关系可以看出,此时的含沙水流上层为顺流,下层为逆流,构造较为复杂。

1.3 水库热分层

水库热分层与水库热量收支状况密切相关。通过水库表面热量收支平衡,可以确定水库单位面积水体蓄热量的变化。蓄热量的增减反映了水体水温的升降。

太阳辐射是水体重要的能量来源。光辐射在水中的传播遵循指数衰减规律:

$$S_r = S_{r0} \exp(-kz) \quad (1-1)$$

式中: S_r 为水深 z 处的辐射强度; S_{r0} 为水表面的辐射强度; k 为衰减系数, $k=1.9\sim 2.2/SD$, SD 为透明度, 单位 m 。

由于太阳辐射强度在水深方向随指数关系衰减, 因此水库的水温在垂直方向有分层现象。把握水库水体温度分层特征, 可以解释水体流动、溶解氧及营养盐等化学成分、水生生物变化和分布的成因, 也可为水库水质管理提供基础和依据。

图 1-3 是北半球水库水温垂直分布的典型案例, 从图中可以看出, 水温在 2 月下旬达到最低点, 然后逐渐上升。从 4 月下旬开始, 表层水温上升较快, 垂直方向开始出现水温分层, 在 7~8 月份水温达到全年的最高, 从 9 月开始水温逐渐下降, 表明水库水体进入释放热量的过程。

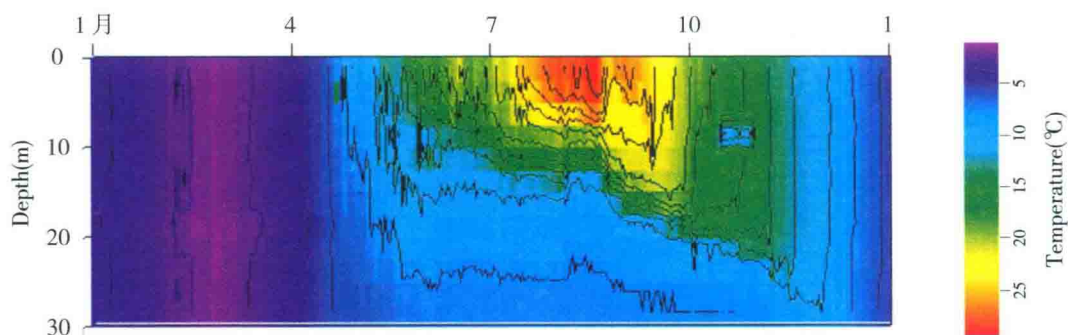


图 1-3 水库水温的季节性分层

从垂直分布来看, 每一次大的气象水文过程, 对水库水体形成冲击, 等温线向水库深处移动。在 5~9 月, 可明显观察到等温线向水深处倾斜, 表明外界输入的能量所引起的垂向混合, 把表层的热量不断带到水库深处。已有监测数据表明, 水库表层的溶解氧及其他营养物质, 也伴随着这个过程从表层输入到水库深处。

随着水库放热过程的持续，垂直方向温度分层逐渐减弱，直到深秋完全消失；垂直方向温度分布均一，水库完全混合，直到次年春末进入下一个周期。

1.4 水库沉积过程

水库水体在气象、水文条件的影响下处于运动状态之中。这种动态的过程包含上述的水体的流动、水位的变化、波浪等物理过程。水体物理过程是引起水化学和生物变化的极其重要的因素。如图 1-1 的入库河流的悬浮物和磷的浓度，对入库流量有极强的响应关系。悬浮物进入水库后，粗颗粒的悬浮物逐渐沉降，而细颗粒的悬浮物将长久地悬浮在水体中，这个过程和水库的大小、外力因素，如下一次洪水、表面风场、水库放流等对水库的扰动强度、水温分层的影响强弱等有关。

如图 1-4，悬浮物粒径变化的趋势为：按河流—水库的顺序，泥沙粒径逐渐变细。这一结果表明了粗颗粒的粒子在河流中发生了沉降，而细颗粒的泥沙则流入库中。

水力停留时间是影响水库水环境的一个重要因子。水力停留时间定义为水库容积与年出库水量的比值。在水库营养盐输入量一定的条件下，水力停留时间的延长意味着水

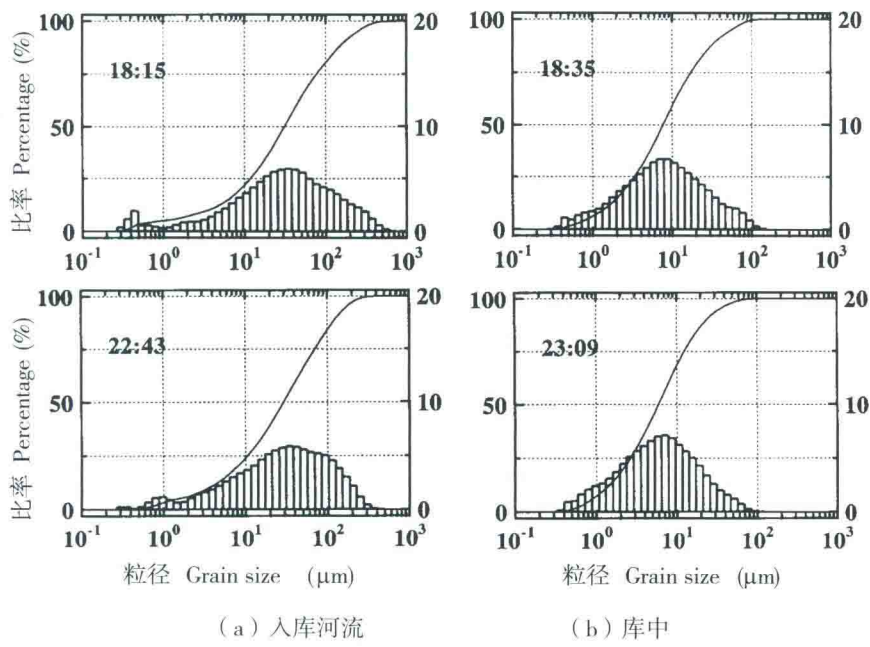


图 1-4 水库内泥沙的粒径分布

库交换的减弱,有利于悬浮物质以及营养盐在水库中的停留,利于浮游植物的吸收利用,会促进藻类的生长。反之,水力停留时间的缩短意味着水库交换的增强,不利于悬浮物质的停留以及营养盐的吸收利用,会导致藻类生物量的减少。

水库悬浮物的沉积:可根据一定时段内进出水库泥沙总量的收支平衡,确定该时段内水库的泥沙淤积量,推算淤积厚度。通过泥沙淤积分布,可以获知水库形态和水深的变化。水库的形态和水深分布,影响水流运动、水库沉积、水库热量交换和水库的化学生物特性等,因此,水库的形态特征也属于水库研究的重要内容。

图 1-5 显示洪水后泥沙淤积的分布,南侧深水区淤积量是北侧浅水区淤积量的数倍,这一结果与水库的地形及含沙水流的流入深度有关;图中还显示水库上游(左侧)到水库下游(右侧)淤积量逐渐减少。

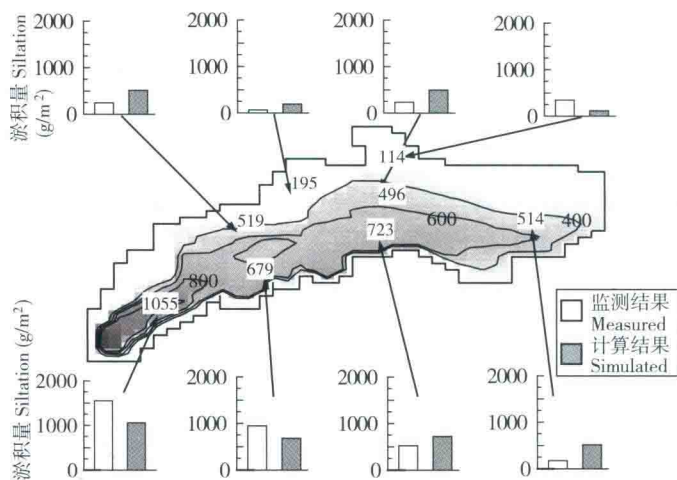


图 1-5 水库的淤积量分布

1.5 水库的化学过程

水库的化学过程主要包括水库水化学成分形成特点和水库富营养化等问题。水库中有营养元素、有机物质、溶解性气体、微量元素和有毒物质等。水库水质的主要指标包括: pH、DO、COD、BOD、碱度、金属离子(钾、钠、钙、镁)、氧化还原电位、氯化物、各态磷、各态氮、 SiO_2 、总有机碳等。水库化学成分形成特点和变化过程与水库流域环

境特征、水流强弱、水库形态特征和气候条件等有关。水库的水化学过程研究是水库水质评价和水污染防治的依据。

近年来水库的富营养化影响了水资源利用，受到极大的关注。水库的富营养化指的是由于流域输入的营养盐的积累，水体的氮、磷等营养元素的富集，水体生产力提高，某些特性藻类（主要为蓝藻、绿藻、硅藻等）异常增殖，导致水体溶解氧减少、透明度下降、鱼类及其他生物大量死亡、水质恶化等，从而使水库生态系统和水体功能受到阻碍和破坏的现象。

如图 1-6 表示水库叶绿素 a 的空间分布特征，水库北侧水深较浅的水域浓度较高，这与营养盐、光照、水温、水流等影响浮游植物生长的环境条件有密切联系。

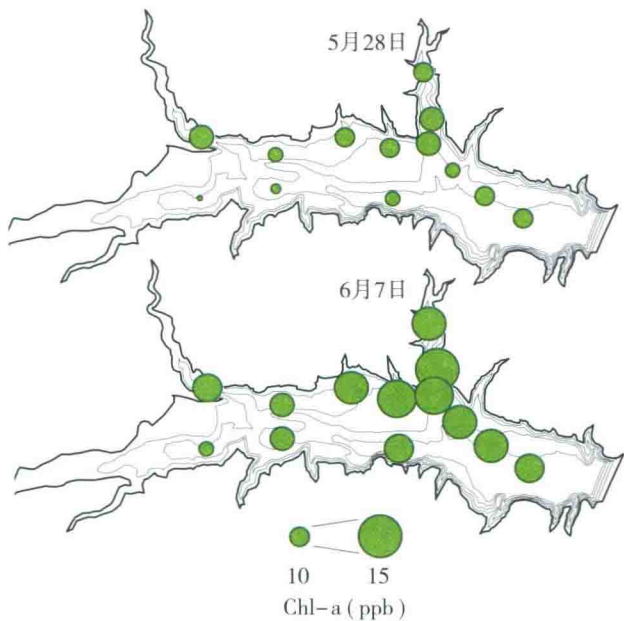


图 1-6 水库叶绿素 a 的空间分布

1.6 水库的生态系统特征

水库作为一个半封闭的水体，其生态系统和湖泊一样具有结构多样性、功能复杂性的特征。水库水体中水生生物具有不同的生态位。水库中的水生植物一般分布在浅水区和水的上层。在岸边，可见一些挺水植物，如芦苇、香蒲等。在水体的上层有大量的浮游植物，其中以单细胞的藻类居多，这些藻类在春末或夏季大量繁殖。水库中的动物分