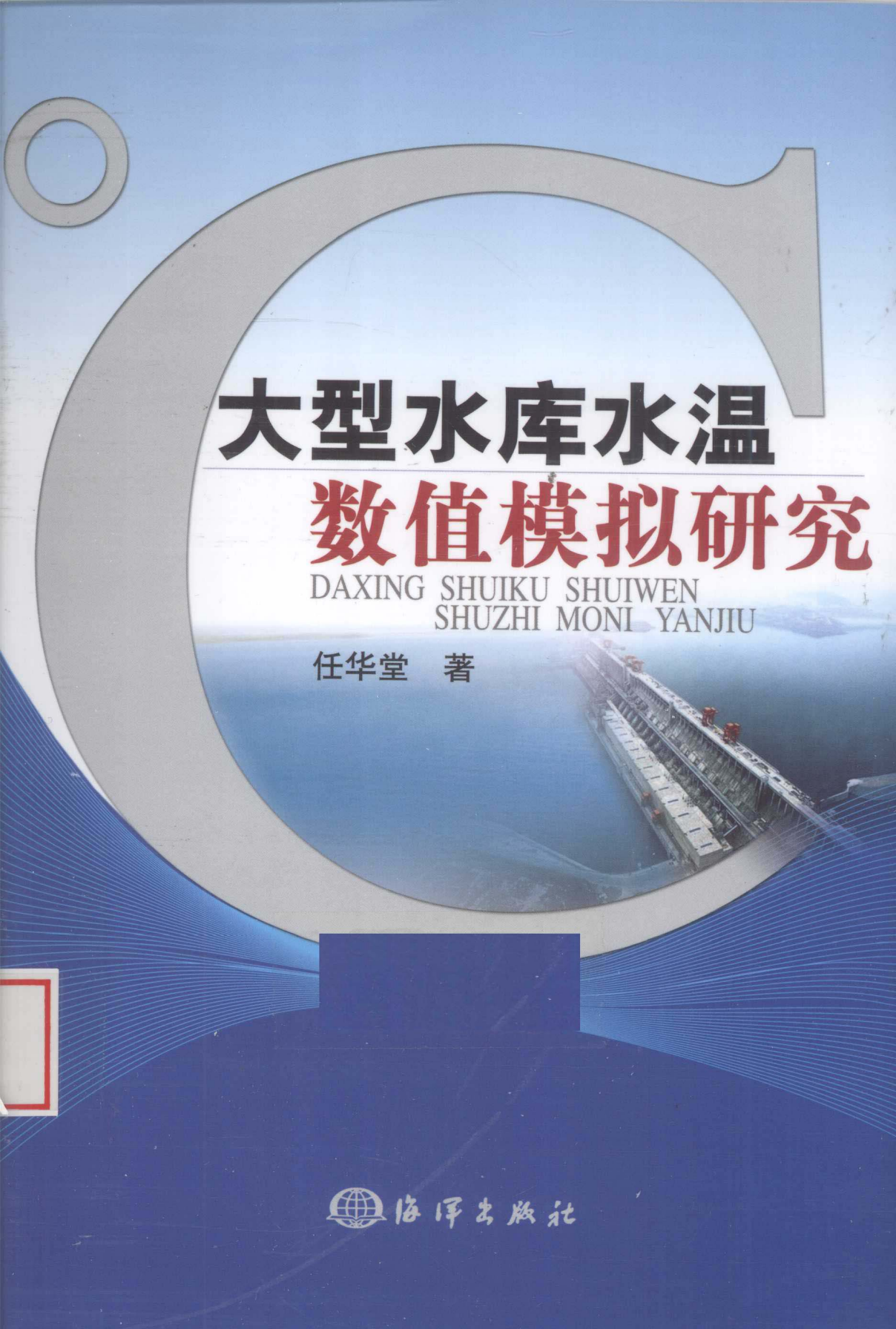




大型水库水温 数值模拟研究

DAXING SHUIKU SHUIWEN
SHUZHI MONI YANJIU

任华堂 著



海洋出版社

大型水库水温数值模拟研究

任华堂 著

海洋出版社

2010年·北京

内 容 简 介

本书针对大型水库的特点建立了三维水温数值模型,并利用该模型对金沙江阿海水库和三峡水库的水温分布情况进行了研究和预测。书中所建模型具有计算量小、精度高等特点。利用该模型对实验室试验水槽异重流、二滩水库、密云水库进行模拟,计算结果与观测资料具有良好的一致性,验证了本模型的可靠性和有效性。书中利用该模型对三峡水库蓄水后特定条件下的水温分布进行预测,分析了水温变化的规律,为三峡水库的调度和水环境保护提供科学依据。该模型在金沙江阿海水库的预测显示阿海水库在枯水年可能出现水温弱分层,为阿海水库建设工程环境影响评价提供参考。

本书可供从事水环境数值模拟研究、水环境影响评价、水资源管理规划人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大型水库水温数值模拟研究/任华堂著. —北京:
海洋出版社, 2010. 8

ISBN 978 - 7 - 5027 - 7796 - 8

I. ①大… II. ①任… III. ①水库—水温—数值模拟—
研究 IV. ①TV697. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 150421 号

责任编辑:高朝君 刘丽霞

责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京海洋印刷厂印刷

2010 年 9 月第 1 版 2010 年 9 月北京第 1 次印刷

开本:787 mm × 960 mm 1/16 印张:10

字数:150 千字 定价:38.00 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

根据水利部发布的《2008 全国水利发展统计公报》,截至 2007 年底,我国已建成各类水库 86 353 座,水库总库容 6 924 亿 m^3 (未含港、澳、台地区)。其中,大型水库 529 座,总库容 5 386 亿 m^3 ,占全部总库容的 77.8%。我国水库的总库容在世界上排名第四,占世界总库容的 9.9%。同时随着我国能源需求的不断增加,水电开发处于快速发展阶段,水库数量尚在进一步增加。在水库的长期建设和运行过程中,其引发的生态环境问题逐步显现并为人们所关注。例如,怒江梯级电站的开发就因生态环境问题引发争议而处于搁置中。

水库建设和运行引发众多生态环境问题,水温变化是最为重要的诱因之一。由于水温对于水体的物理化学性质、生物的繁殖和生长等都具有关键影响,水库蓄水导致的温度变化可能严重破坏生态系统,造成生物种类出现明显的调整。目前,由于水库水温长时期变化的物理模型试验相对困难,数学模型研究是水温研究中主要手段,水温的数值模拟预测研究现已成为生态、环境和水利领域的热点课题。

本书在国家自然科学基金(No. 50909108)资助下,对大型水库水温的三维模拟问题进行了系统分析和深入研究,集成多种先进数值手段建立了大型水库水温数值模型,并利用实验室和自然界的水库水温分层资料进行了验证。利用该模型

对三峡水库特定水文气象条件下的水温分层现象进行模拟预测,给出了初步的结论。最后,利用该模型对金沙江阿海水库枯水年的水温垂向分层结构进行数值预测,为工程设计和水环境保护提供了必要的理论依据。

本书部分研究内容源于作者博士论文,在此谨向导师清华大学陈永灿教授表示衷心的感谢。中央民族大学夏建新教授,清华大学李玉梁教授、刘昭伟副教授、李玲副教授,中山大学程香菊副教授指导或参与了本书的部分研究工作,陶亚、韩凝、赵喜亮、马丽、温竹青、叶坚等在模型的应用过程中付出了辛苦的努力,在此一并表示诚挚的谢意!

由于大型水库的三维数值模拟相对复杂和困难,本书的研究成果尚显粗浅,同时,由于作者时间和水平所限,书中不妥和错漏之处恳请读者予以批评指正。

作 者

2010年5月于北京

目 次

第 1 章 绪论	(1)
1.1 我国水库建设的现状	(1)
1.2 大型水库水温分布特性及其对生态环境的影响	(4)
1.3 大型水库水温分层特性及对水动力特性的影响	(11)
1.4 大型水库水温预测的进展	(14)
1.5 大型水库水温数值预测研究中需要解决的关键问题	(23)
1.6 本书研究的主要问题	(28)
第 2 章 大型水库水温模型	(30)
2.1 水动力学模型	(30)
2.2 紊流模型	(32)
2.3 水温模型	(35)
2.4 垂向坐标变换和 σ 坐标系下控制方程	(40)
2.5 控制方程的定解条件	(42)
2.6 小结	(46)
第 3 章 水温模型的离散求解	(48)
3.1 变量的网格布置	(49)
3.2 控制方程的算子分裂方式	(50)
3.3 自由表面和动量方程的耦合求解	(52)
3.4 平流项的离散格式	(54)
3.5 垂向扩散项的隐式求解	(58)
3.6 σ 坐标系下斜压梯度力和水平扩散项的处理	(62)

3.7	单侧边界坐标拟合法和陆域计算单元扣除法	(67)
3.8	动边界的处理	(69)
3.9	小结	(69)
第4章	模型的验证	(71)
4.1	矩形水池风生环流的验证	(71)
4.2	水库异重流的验证	(73)
4.3	密云水库水温模拟	(80)
4.4	二滩水库水温模拟	(88)
4.5	小结	(99)
第5章	三峡水库水温分层预测	(100)
5.1	三峡工程简介及气象条件	(100)
5.2	三峡水库水温预测现状及存在的问题	(105)
5.3	三峡水库蓄水前后水温的变化规律	(108)
5.4	水库正常调度方式下水温预测研究	(120)
5.5	密云水库、二滩水库和三峡水库水温分层比较	(122)
5.6	小结	(124)
第6章	阿海水库水温分层预测	(125)
6.1	工程概况	(125)
6.2	气象水文条件	(126)
6.3	计算条件	(128)
6.4	计算结果与分析	(130)
6.5	小结	(136)
第7章	结论	(138)
	参考文献	(141)

第 1 章 绪 论

1.1 我国水库建设的现状

“水是生命的源泉”,尤其淡水更是人类和众多生物赖以生存的自然资源,人类的四大文明古国无一不是发源于水资源丰富的地区。中华民族的诞生与发展同样归功于黄河、长江等大江大河流域丰富的水资源。在母亲河的哺育之下,中华民族创造了世界上古老灿烂、历史悠久的中华文明。水不仅养育了中国人健壮的体魄,而且承载着中国人的智慧与情感。从哲学家“上善若水,水善利万物而不争”^[1],到诗人“请君试问东流水,别意与之谁短长”^[2],从音乐家的高山流水、二泉映月到传统中国山水画,无一不反映了中国人和水密不可分的关系。

我国水资源相对匮乏,并且时间和空间分布很不均匀。我国自远古就开始了水利工程的建设,“水之利害,自古而然。禹疏沟洫,随山浚川”^[3],黄河、长江等大江大河更成为我国水利事业发展的例证。水利的兴衰直接关系到整个民族的生存和发展。水利兴,则百姓安,天下定;水利废,则黎民苦,百业危。我国人民在水利工程的建设过程中,不断总结经验教训,逐渐化被动为主动,从单纯地防御洪水发展到调整水资源的时空分布、能源开发等,取得了许多辉煌的成就,造福人民 2 000 余年的都江堰水利工程就是我国人民有效利用水资源的成功范例之一。

在水利工程中,拦河筑坝是有效利用水资源和水能的重要形式之一。中国的大坝及水库历史非常悠久,但鉴于施工技术条件所限,在新中国成立之前发展较慢。根据 1950 年国际大坝委员会统计资料,当时全球 5 268 座水库大坝中,中国仅有 22 座(包括丰满重力坝等),数量极其有限,以水库总的库容和水电总的发电量与国际比较,都处于非常

落后的状态。新中国成立后,特别是改革开放 30 余年来,随着社会经济的迅速发展,在防洪、灌溉、供水和能源安全等各方面对水利工程建设提出了更高的要求,引发中国的水库大坝建设突飞猛进的发展(见表 1.1 至表 1.3)^[4]。根据水利部发布的《2008 全国水利发展统计公报》,截至 2007 年底,我国已建成各类水库 86 353 座,水库总库容 6 924 亿 m³(不含港、澳、台地区)。其中,大型水库 529 座,总库容 5 386 亿 m³,占全部总库容的 77.8%。我国水库的总库容在世界上排名第四,是世界总库容的 9.9%。尤其值得关注的是,随着高坝水库建设技术的不断提高,我国逐渐成为世界高坝水库建设的主力军(见表 1.1 至表 1.3)。

我国 1973 年 30 m 以上大坝共 1 644 座,其中 100 m 以上 14 座,分别占世界的 25% 和 3.5%;1988 年 30 m 以上大坝共 3 768 座,其中 100 m 以上 429 座,分别占世界的 41% 和 7.2%;2005 年年底 30 m 以上大坝共 4 839 座,其中 100 m 以上 130 座,分别占世界的 37.8% 和 15%;2008 年 30 m 以上已建和在建大坝共 5 191 座,其中 100 m 以上 142 座。这些水库的共同特点是水深大,蓄水多,经济效益明显,具有重大的社会影响。

表 1.1 100 m 以上大坝较多的国家

国家	100 m 以上大坝/座	最大坝高/m	最高坝坝名
中国	130	305	锦屏一级
日本	102	186	Kurobe No IV Dam
美国	80	234	Oroville Dam
西班牙	48	202	Almendra Dam
土耳其	45	247	Deriner Dam
伊朗	37	222	Karun IV Dam
印度	29	261	Tehri Dam
意大利	24	262	Vaiont Dam
瑞士	23	285	Grande Dixence Dam
越南	10	139	Son La Dam
智利	8	155	Ralco Dam

注:至 2005 年年底,100 m 以上大坝世界共有 851 座,中国占世界总数的 15%。

表 1.2 世界前十大已建、在建高坝

序号	坝名	坝高/m	建坝目的	国家
1	锦屏一级	305	发电、防洪	中国
2	Nurek	300	发电、灌溉	塔吉克斯坦
3	小湾(云南)	292	发电、防洪、灌溉、航运	中国
4	Grande Dixence	285	发电	瑞士
5	溪洛渡	278	发电、防洪、航运	中国
6	Inguri	272	发电、灌溉	格鲁吉亚
7	Vajont	262	发电	意大利
8	Manuelm. Torres	261	发电	墨西哥
9	Tehri	261	灌溉、供水	印度
10	Alvaro Obregon	260	灌溉、供水	墨西哥

表 1.3 世界前十大已建、在建水电站

序号	坝名	完工年	装机容量/MW	年均发电量/(GW·h)	国家
1	三峡	2009	22 500	84 000	中国
2	Itaipu	1991	12 600	90 000	巴西/巴拉圭
3	溪洛渡	2010	12 600	57 120	中国
4	Guri	1986	10 000	52 000	委内瑞拉
5	Tucurui	1984	8 370	缺资料	巴西
6	Sayano – Shushenskaya	1990	6 400	22 800	俄罗斯
7	向家坝	建设中	6 000	30 747	中国
8	Krasnoyarsk	1967	6 000	19 600	俄罗斯
9	龙滩(广西)	2001	5 400	18 710	中国
10	Bratsk	1964	4 500	22 500	俄罗斯

大量水库尤其是大型高坝水库的建设对于周边地区的防洪、发电、工农业生产生活用水保障、航运安全及生态环境改善等提供了强有力的保障,极大地促进了当地社会经济的发展。但是,不可回避的是,高坝水

库的建设也给河流生态系统带来前所未有的压力。拦河筑坝破坏了河流的连续性,水库的调度改变了河流水文过程的自然变化,使水环境发生一系列的变化。这些变化都将直接或间接影响流域重要生物资源的栖息环境和生活特性,甚至会导致部分物种衰退、濒危和绝迹。

水利,乃利用水资源兴利除弊之举。正确认识大型水库等水利设施对水质和生态环境的影响是水利工程发挥最优效益和实现人类社会可持续发展的先决条件。在水库建设所引发的环境变化中,水库水温垂向分层影响尤为重要。其对垂向水体混合的抑制作用及导致的水质指标垂向差异等对水库的生态环境影响,成为目前环境领域和水利领域研究的热点问题。

1.2 大型水库水温分布特性及其对生态环境的影响

1.2.1 大型水库水温分布特性

大型水库一般而言库容较大,三峡水电站最高水库库容为 393 亿 m^3 ,溪洛渡水库总库容 126.7 亿 m^3 ,二滩水库总库容 58 亿 m^3 。水体在水库中的滞留时间长,流动性差,水体的混合能力较弱,导致水温与自然河流出现较大的差异。

(1)库区水温对气象条件的响应和自然河流相比具有明显的滞后效应和减弱效应。一方面,由于水库蓄水后,水体体积增加,导致水库的热容量大幅增加;另一方面,由于水库的水力停留时间较长,一定程度上减小了出入流的相对影响。二者综合作用使水库水温对气象条件的响应发生延迟,即春夏季节升温时间延后,且升温幅度变小,在秋冬季节降温时间延后,且降温幅度变小,

(2)大型水库水深较深,水库水温在垂向出现相应的时间周期性变化。夏季表层水体受到太阳辐射、大气长波辐射等表面加热作用,水温升高,密度减小,而水体底部水温低,密度大,整个水库垂向处于静力稳定状态,极大地抑制了水体的垂向混合。水体上层的热量很难输送到下层,容易形成自上而下的温度梯度。到了秋冬季,由于气温降低和太阳

短波辐射量的减少,水体表面温度持续下降,导致表面水体密度增加。当表层水体的密度增大到高于下层水体后,水库在垂向即处于静力不稳定状态,水体在垂向出现强混合,也就是所谓的“翻池”现象。“翻池”使水库水温等水质参数趋于均匀分布。

1.2.2 大型水库水温分层的影响因素和分层结构

1) 水温分层的影响因素

大型水库水温分层和随时间变化的性质主要受到如下因素影响。

(1) 水库的面积和水深。当水库的平面面积较大时,风应力的影响比较显著,在表层能够形成明显的温水层,这在湖泊型水库中表现最为明显;水库的水深对水温分层强度具有决定性的影响,水深越小,水体和大气之间的热交换越充分,垂向的温度越均匀,分层越弱,反之,分层越强。

(2) 水文气象条件。当水库水位较高,而入库流量持续较小情况下,水库水体的滞留时间长,有利于温度分层现象的出现。对于气象条件而言,当气温出现快速变化时,由于上游水浅,来水温度对气温的响应速度较快,上游来水和库首水体出现明显温度差,易潜入水库底部或浮于水库上部,形成密度分层;在升温季节,表层水体接收到的热量多于下层水体,上层温度升高较快,和底部的密度差进一步增大,有利于温度分层的进一步发展,反之,在降温季节,表层水体散热较快,能够加速密度层结现象的消失,甚至出现“翻池”现象。

(3) 水库运行方式。当水库在高水位运行时,除了增加水力停留时间外,库首水深加大导致底部水体受到表层水温的影响将进一步加大垂向温差。水库温度分层导致不同高度取水口下泄的水体温度不同,直接影响温度的垂向分布。例如,当取水口位置较低时,将会带走底部低温水,导致垂向温度差异减小。

(4) 入库悬移质。当水体中含有悬移质时,入库的悬移质携带的热量也会对水库的水温垂向分布产生一定的影响。部分水库,在夏季汛期悬移质浓度较大,形成高温异重流深入库首底部导致库首底部低温层减弱,水库的垂向分层减弱^[5],如果水库本身分层比较强,也可能导致表层

(表面热交换形成)和底部(高温异重流)水温高而中部水温低的垂向分布结构,如图 1.1、图 1.2 所示^[6]。

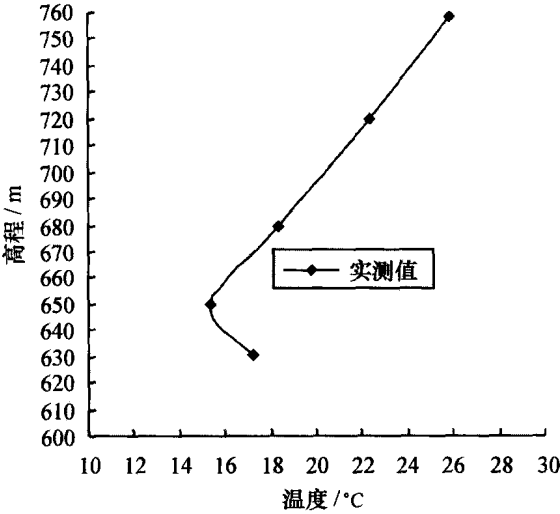


图 1.1 二滩水库 2005 年 7 月坝前水温垂向结构

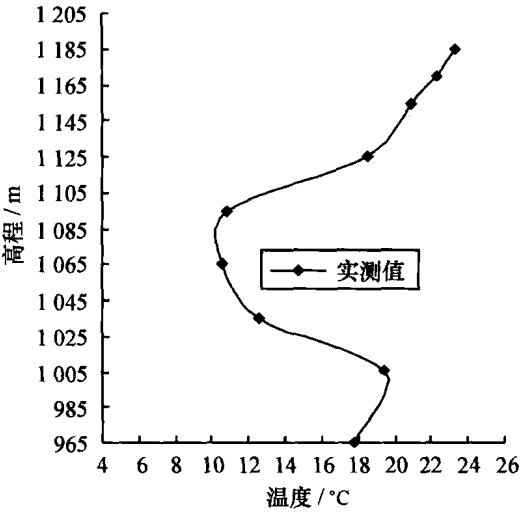


图 1.2 乌江渡水库 1984 年 8 月坝前水温垂向结构

(5)水库蓄水季节的选择。由于大型水库的水力停留时间较长,水库温度的初始场影响时间尺度远大于自然河流,因此,水库水温对于初

始场的依赖性较强。如果蓄水季节主要集中于冬季,则在春季、夏季形成的分层会更强。

2) 水温分层结构

在我国,水温分层现象广泛存在于大型水库中,在密云水库、二滩水库、丹江口水库、丰满水库、新安江水库等都观测到明显的温度分层。但是,由于不同水库的水文气象条件及运行方式等特性不同,水库的水温垂向结构也有所不同。

一般而言,大型水库根据水温的垂向差异可以分为温水层、温跃层、深水层,如图 1.3 所示。温水层分布于水库表层,由于风力影响或昼夜温差的变化,导致该层流体的温度混合比较均匀。温跃层为垂向温度梯度较大的水层,形成原因主要有两种:一种是升温季节水库上部受气象条件影响升温比较快而底部水体无法接受到大量热量,导致上下层水体出现较大的温度梯度;另外一种原因是由于库尾入流水温和库首水温差异性较强,入流潜入库底或浮于表层,与库内原有水体之间形成明显的温度界面。当然,在库首取水口的抽吸作用也会对温跃层的强度及位置有一定影响。水库的深水层位于水库底部,水温较低且在层内相对比较均匀,对于深水水库一般是由于长时间内基本不受气象条件影响形成的温度基本恒定的流体,冬季上游冷水进入水库对深水层会起到加强作用。

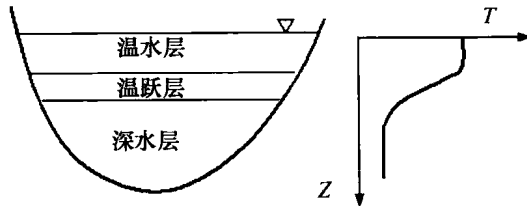


图 1.3 典型水库水温垂向分层示意

在实际水库中由于前节所述的各种因素的影响,水温的垂向分布更加复杂。比如,在较窄的河道型水库内由于风应力的影响较弱,表面的温水层不明显甚至会由于水表面吸收热量较多形成表面温跃层,从而在垂向呈现双温跃层结构,如二滩水库(见图 1.4)。再如,在泥沙浓度较大的水库内,夏季由于泥沙异重流作用,导致库区表层和底部温度高而

中部温度低的垂向结构(见图 1.1、图 1.2)。

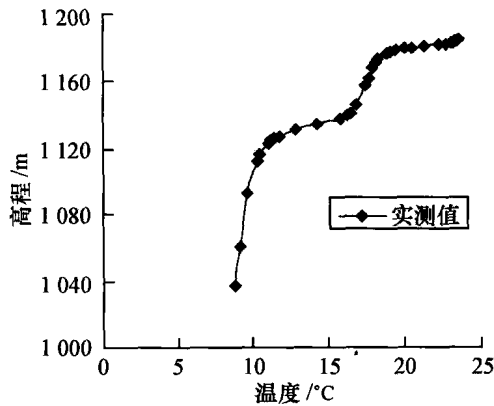


图 1.4 2000 年 5 月 30 日二滩水库坝前水温垂向结构

1.2.3 水温对水域生态环境的影响

“没有任何一种因素能像温度一样对生态系统内的物理化学、生物、新陈代谢、生理行为等过程有如此重大的直接或间接影响”^[7]。水温对水生生态系统的影响深入到各个方面。

(1) 水温对植物的生长产生重要影响。植物种子的萌芽、发育、生长速度、发病和休眠都和环境中的温度密切相关。在自然界中,只有极少数种类水生植物能在 10℃ 以下保持生长,当温度低于 3℃ 或高于 45℃,绝大多数水生植物会死亡或进入休眠状态^[8-10]。植物繁殖季节的抽芽过程在部分程度上受到环境温度的调节^[11-14]。许多水下藻类的繁殖发芽需要适宜的温度范围,如美洲苦草需要的温度为 7℃ ~ 20℃^[15],篦齿眼子菜需要的温度为 3℃ ~ 15℃^[14]。北部雌雄同株类型黑藻,越冬枝条在 8℃ ~ 16℃ 才能抽芽,且积温超过 777℃·d 抽芽率才能达到 50%;南部雌雄同株类型黑藻,越冬枝条在 12℃ ~ 21℃ 才能抽芽,且积温超过 1 295℃·d 抽芽率才能达到 50%^[16-17]。这也正是雌雄同株类型黑藻成为北美地区优势物种的温度原因。此外,由于植物分裂繁殖需要较高的温度,导致这种繁殖方式主要存在于北美南部^[17-18]。

(2) 环境温度和积温对植物种类具有决定性的影响。例如,在北欧

水生植物种类由南向北出现 74% 的减少和 7 月平均温度的降低具有明显的相关性^[19]。与此相似,北美中部水生植物群落的物种和水温年平均值呈现明显正相关。研究也发现沿喜马拉雅山下泄河流随高度变化的温度导致沿流水生植物物种出现明显带状分布^[20]。据报道,受温度影响,目前水生植物的极限海拔高度为 4 780 m^[21]。植物的群落结构也直接受到水温的影响。研究发现蒲儿菜和湿地勿忘草在 11℃ ~ 12℃ 的条件下可以共存,但在 24℃ ~ 25℃ 的条件下蒲儿菜具有明显的竞争优势^[22]。

(3) 水温的年际变化也可能对水下植物的生长起到明显影响。关于魁北克北部湖泊的研究^[23]发现,水生植物在气候温暖年份比寒冷年份可以生长的深度增加 25% ~ 170%,同时生物量也可以增加 45% ~ 1160%。与此类似,一般情况下电厂排水口附近水生植物生长率也会较高^[24-25]。

(4) 大部分藻类的光合作用、呼吸强度与水温、光强关系密切。藻类代谢活动强度与温度符合一般生理学规律:在其他环境条件适合的情况下,在一定的温度范围内,温度上升 10℃,藻类代谢活动增加 2 倍。水温一方面影响藻类的生理生化活动,另一方面对藻类的生物量和种类也有一定的决定作用。例如,Cairns 研究美国宾夕法尼亚小河中藻类与温度的关系发现 20℃ 左右时该河中以硅藻为主,30℃ 时以绿藻为主,40℃ 时以蓝藻为主^[26]。王得玉^[27]通过 1998 年太湖蓝藻暴发影响因子研究发现,在水体富营养化前提下,水体温度是影响蓝藻生长的重要环境因子:合适的水体温度(24℃ ~ 30℃)是蓝藻暴发的必要条件;大于 30℃ 的高温,对蓝藻的生长有明显的抑制作用。

(5) 水库水温还会通过农业灌溉对农作物的生长产生重要影响^[28]。例如,水稻对水温的要求一般在 28℃ ~ 38℃ 比较合适,水温过高对营养物质的积累不利,同时容易引起病虫害,增加田间杂草;水温过低会使地温降低,肥料不易分解,稻根生长不良,植株矮,发育迟,谷穗短,产量降低。由于水稻本身的生理特性,不同发育阶段对水温的要求也不相同。综合目前国内有关的观测资料,水稻各生育期对水温的要求见表 1.4。

表 1.4 水稻各生育期对水温(℃)的要求

生育阶段	最适水温	最低水温	最高水温
发芽	30 ~ 35	10 ~ 13	36 ~ 42
幼苗	28 ~ 32	15	36 ~ 40
返青	30 ~ 35	18	36 ~ 40
分蘖	32 ~ 34	19	36 ~ 40
孕穗	28 ~ 30	18	36 ~ 38
抽穗扬花	30 ~ 35	20	32 ~ 40
乳熟黄熟	35 ~ 38	20	36 ~ 42

(6)与对植物的影响相似,水温还对其中的动物具有重要影响。例如,鱼类属变温动物,体温随水温的变化而变化,水温直接影响鱼的生存和生长^[29]。各种鱼类都有自身生长的适温范围和最适宜的温度范围。北方鱼类鲤、草、鲢、鳙、鲫鱼生长的适温范围在 15℃ ~ 32℃,最适生长水温为 20℃ ~ 28℃,高于或低于适宜温度都会影响鱼类的生长和生存。上述鱼类在水温降到 15℃ 以下时,食欲下降,生长缓慢;低于 10℃ 时,摄食量便很快减少;低于 6℃ 时,会停止摄食;水温高于 32℃ 时,食欲同样会降低。水温影响鱼类的性腺发育和决定产卵开始的时间。我国南部地区由于全年水温比较高,鲢、鳙、草、青鱼性腺发育也较快,成熟较早,性腺成熟年龄一般比北方早 1 ~ 2 年。我国南北地区亲鱼产卵所要求的水温一般都在 18℃ 开始产卵。青、草、鲢、鳙鱼人工催产的适宜水温为 22℃ ~ 28℃,18℃ 以下催产效果差,15℃ 以下催产则亲鱼无反应。当水库没有达到鱼类产卵温度要求的水域时,鱼产量将会降低。如果水库建设导致水体温度变化较大,有可能引起多种水生生物的灭绝,导致水域内整个生态系统重新调整。

(7)水温除了直接对生态环境产生影响外,还通过对水体其他物理化学性质的影响对生态环境产生影响。气体溶解度和水温密切相关。水环境中气体溶解度一般随温度升高而减少。当水温在 0℃ ~ 30℃ 时,水温与溶解氧浓度(DO)含量呈负相关。水温每增加 6℃ ~ 10℃,DO 值要减少 0.5 ~ 3.0 mg/L,如图 1.5 所示。再如,氨氮(NH₃ - N)以离子态