

水库水温与 水稻丰产灌溉

刘 仲 桂



水利电力出版社

水库水温与 水稻丰产灌溉

刘仲桂

水利电力出版社

内 容 提 要

本书主要介绍水库水体的温度变化特性、灌溉水温对水稻生长和产量的影响以及为促进水稻高产所需采取的工程技术措施和其它有关措施等内容。

本书可供坝工设计、水库取水建筑物设计、水库生态环境研究和省、地、县各级有关水利灌溉、工程管理等方面的工程技术人员参考，也可供水利类大中专院校师生参考。

2W47/p8

水库水温与水稻丰产灌溉

刘 仲 桂

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

轻工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 7印张 154千字

1985年6月第一版 1985年6月北京第一次印刷

印数 0001—2920册 定价1.45元

书号 15143·5723

前 言

建国以来，我国已建成大中小型水库工程 86400 余处，水库灌溉面积达 24000 万亩，这对促进我国农业生产的发展起了重要的作用。

随着世界人口的激增和科学技术的发展，如何进一步提高粮食作物的产量已成为当今世界上的一个主要问题。为了夺取粮食作物的稳产高产，对科学用水提出了更高的要求，即除满足作物对水量的要求外，还需满足作物对灌溉水质的要求。

在灌溉水质方面，灌溉水温是非常重要的一个内容。特别是在水库灌区，由于在水稻生长期內，引用水库底层低温水进行灌溉，影响水稻的生长和产量，因此，研究灌溉水温成为当前进一步促进水稻丰产的重要课题。试验表明，利用水库表层温水灌溉早稻比用水库底层冷水灌溉可提高产量 5 ~ 15%，在东北地区甚至可以增产 30% 以上。从国内外实测水库水温资料分析得出，水深大于 30 米的水库，其库底水温在 4 ~ 12℃ 左右，引用这种温度的水来灌溉水稻势必造成减产。

研究水库水体温度变化的特性，可为水库生态环境分析、坝工结构设计和水库分层取水建筑物设计等提供可靠的第一手资料。

作者在整理和编写本书的过程中，得到了我国老水利专家麦蕴瑜总工程师的热情关怀和支持，多次建议和催促笔者

将有关灌溉水温与水稻生长和产量关系方面的有关知识撰写成书稿；许志方教授和茆智副教授指导和帮助笔者开展了有关该课题的试验研究工作；在试验过程中得到了湖北省水利厅、湖北省黄梅县古角水库、广济县梅川水库等单位的大力支持；在收集资料和编写过程中，得到了江西省水利科研所、吉林省水利科研所和广西壮族自治区水利电力厅等单位的大力支持与帮助，谨此表示诚挚的谢意。

在本书中搜集了近期国内外该课题的部分资料，以及作者所进行的有关水库水温观测和田间试验与分析成果。编写时，力求深入浅出，顺理成章。但由于该书的内容牵涉到传热学、水稻生理基础、水工建筑物和灌溉管理等许多学科的理论 and 实践，知识面广、内容繁杂；加之作者水平较低，不少问题研究的不够全面，不太深刻，对有些问题的认识还有待深化。因此，缺点和谬误之处一定不少，恳切地希望读者提出意见，以便今后进一步修订、充实和提高。

编 者

1984年6月

目 录

前 言

第一章	水库水体的温度变化特性	1
第一节	水库水体的热力学概况	2
第二节	水库水温观测	13
第三节	水库水体温度场的特性及其数学模型	23
第四节	水库水体温度场与生态环境	79
第五节	其他水源的温度状况	85
第二章	水温与水稻生长	93
第一节	概述	93
第二节	水温与水稻生长的关系	95
第三节	低温对水稻生长的影响	103
第四节	水温对稻田生态环境的影响	117
第五节	灌溉水温对水稻生长和产量的影响	125
第三章	获取水库中适宜温度的水进行灌溉	141
第一节	水库取水建筑物概况	141
第二节	水库分层取水建筑物的类型	149
第三节	水库分层取水建筑物设计简介	158
第四节	水库分层取水建筑物实例	166
第四章	其他提高灌溉水温的措施	199
第一节	工程技术措施	199
第二节	田间调温措施	204
第三节	农业技术措施	214

第一章 水库水体的温度变化特性

水库蓄水以后，它不仅可以调节天然河流迳流量的变化，而且还可以调节自然界太阳辐射热能的作用。由于每一水库所处地理位置不同，因此，所接受的太阳辐射也就有一定的区别。同时，由于各水库的规模、水深等情况的差异，故可能造成水体热传导、对流换热等时间、空间的不同变化特性。这样，使水库水体温度变化既有大致相同的总变化趋势，又有每一座水库水体的热力学特性。

水库水体的温度变化特性对稻作灌溉影响较大，例如，我国长江流域中下游的双季稻种植区，在早稻稻株生长前期经常遇到低温天气的影响，如果再取用水库中的低温水来进行灌溉，就会造成对水稻生长和产量方面更不利的影响；在北方，大部分水稻种植区的气温都比较低，如果也是取用水库中的低温水进行灌溉，则对水稻生长的危害性也就更为严重。因此，为了选取水库中适宜温度的水来进行灌溉，就需要研究水库水体的温度变化特性，以便采取适当的措施，获取适宜温度的库水来灌溉稻田，满足水稻生长的要求，促进稻谷高产稳产。

水库水体的广阔水面是发展养鱼和多种经营的良好场所。当采用人工繁殖鱼苗时，大多需要在早春季节里进行，例如，在长江流域的中下游地区，一般在四月中旬进行鱼苗孵化，鱼苗孵化的适宜水温是 20°C 左右，人们大多采用塘堰或水库坝后的鱼苗池作为鱼苗孵化的场所，因此，应该了解水

库水体的温度变化特性，以选取水库中适宜温度的水来引进塘堰或鱼苗池，满足其对水温的要求，促进鱼苗孵化和加速鱼苗的成长。

大型火电站或部分水电站需要采用冷却水源来调节厂房内的空气湿度和温度，研究水库水体的温度变化特性，以便能从水库中获取适宜温度的水来作为经济、合理的天然冷却水源，达到电站降温减湿的目的。

水库水体温度的变化状况与地震也有一定的关系，当我们在进行水库水温观测过程中发现水温的异常变化情况时，应及时进行分析，了解出现异常现象的原因，并及时与当地地震预报台站联系，以便为地震预报分析工作提供参考资料。

在混凝土重力坝和拱坝的设计中，水库水温变化是一个非常重要的温度荷载和环境因素，在部分情况下，该温度荷载对坝工结构设计起着控制性的作用。因此，在混凝土重力坝与拱坝的设计、施工和运行管理中，都必须了解水库水体温度变化的规律与特性，以使工程设计能较正确地反映客观实际，从而得到既安全又经济的坝体建筑物设计方案。

水库水温变化规律与特性，对赖以水体为生态环境的动植物影响也是比较大的，而且，由于水体温度状况的不同对水体生态环境中的物理、化学和生态环境也有一定的影响。

第一节 水库水体的热力学概况

水库水体的热量主要来源于太阳辐射、大气辐射以及由于降雨、入流等所带来的热量；它们通过反射辐射、乱流交换、水体增温、蒸发和出流等而吸收和消耗一部分热量。但是，根据物质的热量平衡原理，在任何时段内，水库水体所

获得的热量与消耗的热量是处于平衡状态的，从而保持水体在该时段内处于一种相对的平衡温度状况。

到达水库水体表面的太阳辐射 (Q_0)，一部分被水体本身所吸收 (Q_A)，一部分被水体所反射 (Q_R)，另外，还有一部分透过水体 (Q_D)，即

$$Q_0 = Q_A + Q_R + Q_D \quad (1-1)$$

一般来说，太阳的红外辐射（一般亦称长波辐射）大部分都被 1 米厚度的水层所吸收；水体对太阳辐射的反射辐射随着太阳辐射的入射角的增大而增加。当太阳高度较低时，水库水体所反射的太阳辐射能量增加，而水体所吸收的太阳辐射能量减少；当太阳高度较大时，反射与吸收情况与上面情况相反。

水体所吸收的太阳辐射能量可转化为水体的热能，同时，透入水体的太阳辐射能也转化为水体的内能，这两者都起着使水体温度升高的作用。然而，太阳辐射的这种热能转换特性，不仅与水库所处地理位置、特性和水文条件等因素有关，而且还与水体的透明度有关。这些因素有：水库的规模和形态、水深、坝体朝向、盛行风级和吸程、气候条件、水库所处地理纬度、入流量、出流量、降雨量和入流水量与库容比等。水库水体的透明度随气候条件、降雨特性、入流、出流、水深和浮游生物的种类、组成及其数量的变化而改变。

水库水体能量转换情况可以图1-1的模式给予说明，从该图中可以看出，宇宙空间—大气层—陆圈形成一个大的热量流动循环系统。水库水体和大气都是开敞系统，它们可以通过交界面来进行热量交换。而且，水体内的各部位都在进行着对流、传导、吸收等一系列的热交换作用。这样，水库水

体与大气层又共同形成了一个热循环的封闭系统。

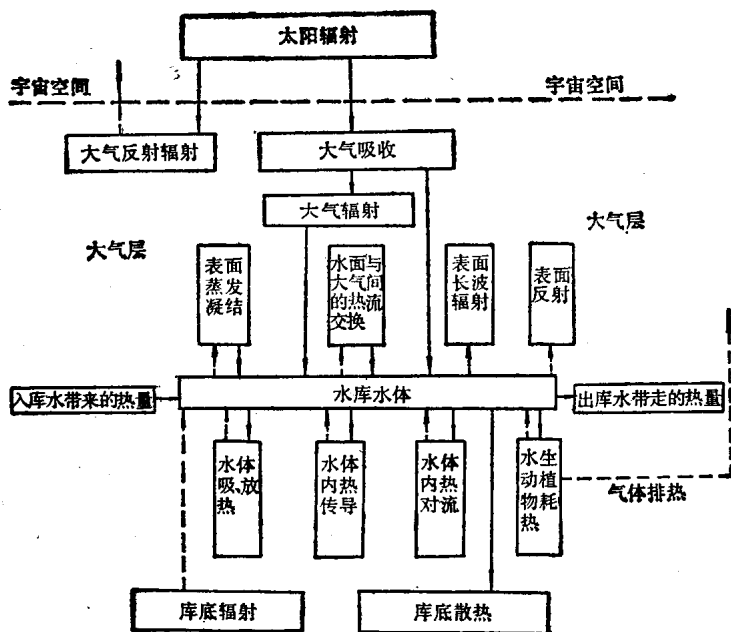


图 1-1 水库水体热能流动模式图

水库水体对太阳辐射能量的吸收是形成水体温度变化特性的一个重要过程。通过大量的观测分析得出，透过大气层的太阳辐射到达水库水体表面以后，大部分辐射能迅速地被表层水体所吸收，剩下的部分辐射能近似地随水体深度的增加而呈指数地衰减，一般来说，在水体内入射辐射的变化遵循如下规律

$$I_h = I_s (1 - \beta) e^{-a h} \quad (1-2)$$

$$I_s = (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \Omega) P_l I_0 \quad (1-3)$$

式中 I_h ——水深 h 处的辐射强度 (见图 1-2) (千卡/厘米²);

I_s ——到达水体表面的太阳辐射强度(千卡/厘米²)。

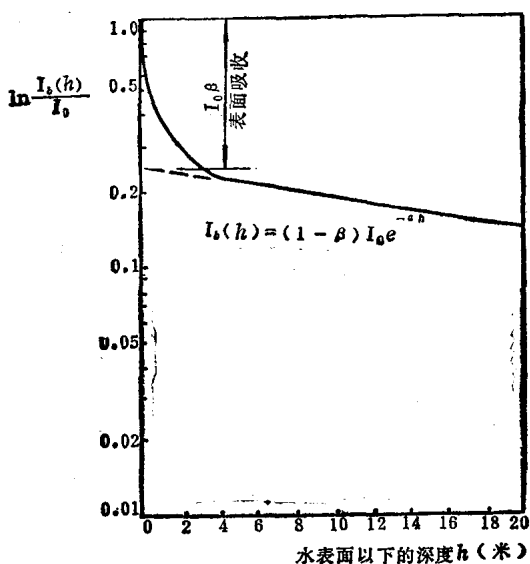


图 1-2 水体内的入射太阳辐射

一般来说, I_s 可以采用水库附近气象台直接观测得到的太阳辐射强度 (举例列于表 1-1); 在没有实测资料的地方, 也可以采用理论公式来计算太阳辐射强度, 对于地球表面某地某时所可能接受的太阳辐射可按式 (1-3) 估算

I_0 ——太阳常数, 可取为 2.0 卡/厘米²·分;

P_l ——大气透明度, 最好的晴天时 $P_l = 0.85$, 很好的晴天 $P_l = 0.80$, 中等晴朗天气时 $P_l = 0.65$, 较差的晴天 $P_l = 0.532$;

φ ——计算地点所处地理纬度, 对于北半球 φ 取正

表 1-1

我国部分地区月平均和年内太阳总辐射量观测资料表*

气象台	月 份											
	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二
哈尔滨	4.5	6.5	10.3	12.2	14.9	15.3	14.3	12.9	10.6	7.8	5.0	3.8
沈阳	5.2	6.9	10.7	12.9	15.2	14.7	13.5	12.9	11.7	8.7	5.7	4.5
北京	6.3	7.5	11.0	13.2	15.8	15.8	14.3	13.0	12.0	9.3	6.4	5.5
南京	6.4	6.7	9.2	10.7	12.4	12.9	14.1	14.1	10.3	9.5	6.7	6.1
西安	6.0	6.3	8.8	10.6	12.8	14.1	13.8	13.5	9.4	7.8	5.8	5.4
兰州	7.1	8.5	11.7	13.5	15.6	16.1	15.9	14.8	11.4	9.9	7.5	6.6
喀什	6.1	7.3	10.9	13.5	17.0	18.7	18.7	16.6	13.4	10.8	7.3	5.6
成都	4.5	4.7	7.0	8.4	10.1	10.1	11.4	11.1	7.2	5.5	4.4	4.0
广州	7.2	6.0	6.9	8.1	10.8	10.9	13.7	13.1	11.5	11.2	9.0	7.6
昆明	10.4	11.2	15.0	15.9	15.0	11.0	11.1	12.1	11.0	9.4	9.8	9.4
拉萨	13.3	16.6	18.5	22.2	20.7	18.7	18.0	17.6	17.6	14.0	12.4	13.7
												202.4

* (1) 太阳辐射能量的单位为千卡/厘米²;

(2) 本资料取自中央气象局气象科学情报所二室和气象研究所农业气象室的“1951~1970年中国气象资料总结”。

值，南半球取负值；

δ ——太阳所处的纬度情况，对于北半球来说，当太阳位于赤道时（春秋分日） $\delta=0$ ，太阳位于赤道以北时（夏半年） δ 取正值，太阳位于赤道以南时（冬半年） δ 取负值，对于南半球来说， δ 值的取值与北半球相反；

Ω ——时角，对于北半球，真正午时（当地时间12点整） $\Omega=0$ ，上午 Ω 取正值，下午取负值。对于南半球 Ω 取值与北半球相反（地球每小时自转 15° ）；

β ——水体表面所吸收太阳辐射能量的比例， β 值在水体内的分布情况可参见表1-2，一般来说，对于水库和湖泊可取用 $\beta=0.4$ ；

α ——水体吸收系数（或称消光系数），其值在0.1~0.9之间，随水库水体透明度的不同而发生着

表 1-2 太阳辐射光谱在水体内分布情况

光谱区 $\Delta\lambda (\mu)$	水层厚度（厘米）								
	0	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000	10000
0.3~0.6	237.0	237.0	237.0	237.0	236.9	230.9	229.4	172.9	13.9
0.6~0.9	359.7	359.7	359.7	359.0	353.4	250.1	128.6	9.5	—
0.9~1.2	178.8	178.7	178.1	172.2	122.8	61.3	—	—	—
1.2~1.5	86.6	86.1	81.8	63.3	17.1	7.0	—	—	—
1.5~1.8	80.0	78.2	63.7	27.0	—	—	—	—	—
1.8~2.1	25.0	23.0	10.9	—	—	—	—	—	—
2.1~2.4	25.3	24.5	18.9	1.1	—	—	—	—	—
2.4~2.7	7.2	6.3	2.0	—	—	—	—	—	—
2.7~3.0	0.4	0.2	—	—	—	—	—	—	—
总计	1000.0	993.7	952.1	859.6	730.2	549.3	358.0	182.4	13.9

变化。

大气辐射受大气层中许多变化因素的影响，例如，大气中的水分、温度、臭氧、二氧化碳和三氧化碳等的变化情况，都直接影响着到达水库水体表面的大气辐射能量。大气辐射能量的大小，可以根据斯蒂芬-波尔兹曼 (SETFAN-BOLTZMAN) 定律采用下式计算

$$I_a = 0.97\sigma T_a^4 \beta_w \quad (1-4)$$

式中 I_a ——大气辐射 (瓦/米²)；

σ ——斯蒂芬-波尔兹曼常数，其值为 5.67×10^{-8} 瓦/米²·°K⁴；

T_a ——气温 (°K)；

β_w ——考虑大气含水量的修正系数；

0.97——正常气温下的大气辐射率。

水体的表面辐射也可以采用斯蒂芬-波尔兹曼定律来计算

$$I_w = 0.97\sigma T_s^4 \quad (1-5)$$

式中 I_w ——水体的表面反射辐射 (瓦/米²)；

T_s ——水体的表面温度 (°K)；

其余符号意义同前。

当空气中的水汽压小于其相应水体表面温度的空气饱和水汽压时，水就会蒸发到空气里去，这时，通过水体表面的蒸发作用就会消耗水体中的部分热能。

由于太阳辐射热能具有上述被水体吸收、反射和透过的

* °K为绝对温度；

°C为摄氏温度 (国际温标) $t^{\circ}\text{C} = T^{\circ}\text{K} - 273.15$ ；

°F为华氏温度 $t^{\circ}\text{C} = (T^{\circ}\text{F} - 32) \times \frac{5}{9}$ 。

特性。因此在水体中就会形成温度梯度，而且在这种温度梯度的作用下，水体内部产生了热的对流和传导作用。

水库水体中的导热过程是依靠水分子的运动而进行热量传递的，其导热通量为

$$Q_c = -\lambda F \frac{dT}{dh} \quad (1-6)$$

或

$$Q_c = -\frac{1}{R_\lambda} \frac{dT}{dh} \quad (1-7)$$

式中 λ ——导热系数，它是衡量水体导热能力的重要指标，它表示在单位温度梯度作用下，水体内部所产生的热流密度值。当水体温度处于 $0 \sim 200^\circ\text{C}$ 之间时，其 $\lambda = 0.40 \sim 0.55$ 大卡/米·小时· $^\circ\text{C}$ ，该值随温度的升高而增加；

R_λ ——导热热阻；

F ——导热面面积；

$\frac{dT}{dh}$ ——沿水体水深方向上的温度梯度。

水库水体的对流是由于水体密度不同而形成的，它处于紊流状态下的对流换热过程。当水体表面或内部出现不同温度状况时，其密度也会随着发生变化；水在 4°C 时的密度为最大（图1-3），其值为 1 千克/米³；水温高于 4°C 时，其密度反而变小。温度较高的水体由于密度较小，故上升到水体表面，而温度较低的水体由于其密度较大而向水体下部沉降；这样，在水体内就形成了上下水体进行对流换热的过程。

水库水体的另一个热特性是热容量大，即单位体积的水

体能够携带较多的热量；因此，水体以对流作用转换热量的能力也比较大。例如，在常温情况下，水的 $\rho C_p = 4186$ 千焦耳/米³·℃，而空气的 $\rho C_p = 121$ 千焦耳/米³·℃（ ρ ——密度，公斤/米³； C_p ——定压比热，千焦耳/公斤·℃）。由此可见水的 ρC_p 值是空气的34倍，这也就说明水体的吸热和散热过程都比空气缓慢，而且，水体对太阳辐射能量吸收的累积效应也是很大的。这就是水库水体能够起到调节周围环境温度的一个主要原因。

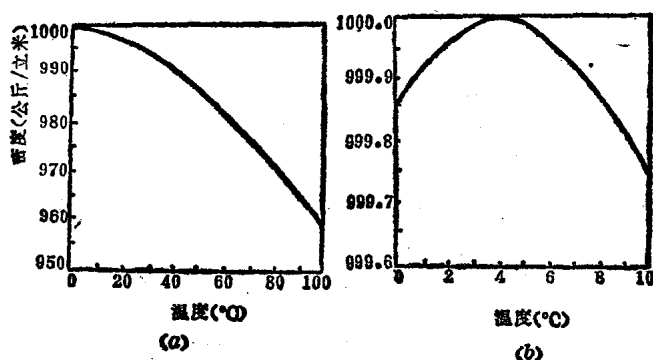


图 1-3 在一个大气压下水的密度变化情况

(a) 0~100℃情况下密度变化曲线；(b) 0~10℃间的密度变化曲线

然而，水库所处地理纬度决定了太阳高度角的大小、昼夜和四季的长短等，而且，也决定了太阳辐射强度和水体热量收支情况的变化。

水库水体在不同时刻其热量收支情况是不相同的，现列举水体在白天和晚上热量收支的情况，见表1-3。从表中可以看出，水体表面反射辐射的大小与其本身温度有关；而蒸发

速度除与温度有关外，还取决于水面上的水汽饱和差和空气流通的情况。当水面上空气较干燥、温度较高、风速较大时，则蒸发强度也较大；反之，则蒸发强度较弱。在水温比气温高的情况下，例如，在夜晚，水体表面向大气输送热量。

表 1-3

水库水体热量收支情况表

白 天		夜 晚	
热量收入	热量支出	热量收入	热量支出
Q_s 太阳辐射	Q_e 表面蒸发耗热	Q_a 大气辐射	Q_{sl} 表面反射辐射
Q_a 大气辐射	Q_{sa} 表面与大气间乱流换	Q_{sa} 表面与大	Q_b 水中动植物呼吸耗热
Q_r 库底辐射	热	气间乱流换热	Q_D 库底散热
Q_i 流入水体	Q_{sl} 表面反射辐射	Q_r 库底辐射	Q_o 流出水体带走的热量
带来的热量	Q_b 水中动植物呼吸耗热	Q_i 流入水体	Q_e 表面蒸发耗热
Q_h 有机物质	Q_D 库底散热	带来的热量	Q_{ia} 水体中热量输送所造
腐烂发热	Q_o 流出水体带走的热量	Q_h 有机物质	成的热量损失
	Q_{ia} 水体中热量输送所造	腐烂发热	
	成的热量损失		
$\Delta Q = (Q_s + Q_a + Q_r + Q_i + Q_h) - (Q_e + Q_{sa} + Q_{sl} + Q_b + Q_D + Q_o + Q_{ia})$		$\Delta Q = (Q_a + Q_{sa} + Q_r + Q_i + Q_h) - (Q_{sl} + Q_b + Q_D + Q_o + Q_e + Q_{ia})$	

当水库水体的热量收入超过热量支出时 ($\Delta Q > 0$)，为水体的吸热增温过程；当水体的热量支出超过热量收入时 ($\Delta Q < 0$)，为水体的放热降温过程；当热量收支相等时 ($\Delta Q = 0$)，水体温度处于相对平衡状态。水库水体在大多数时间里是处于热量收支的不平衡状态，即每时每刻水体各部位的温度都在发生着变化。

由于各水库所处地理位置和本身特性的不同，所得到的太阳辐射也不一样。虽然各水库都具有其本身的热力学特