

井灌水稻区晒水池升温机理的初步研究

门宝辉¹, 付强¹, 刘庆华², 魏永霞²

(1 四川大学 水电学院, 四川 成都 610065; 2 东北农业大学 水利与建筑学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

[摘要] 针对井灌区井水灌溉水温低的特点, 为防止井灌水稻冷水害的发生, 通过太阳辐射-水体-土壤这一连续体模型, 利用数学知识解微分方程的方法, 建立了静水情况下晒水池平衡水温的数学模型, 并结合实例说明了各参数的数值算法; 建立了晒水池内任意时刻各点水温的预测模型, 并利用实测水温加以验证, 其最大相对误差在9.6%以内, 预测精度符合要求。

[关键词] 井灌水稻; 晒水池; 冷水害; 太阳辐射

[中图分类号] S275.1 **[文献标识码]** A

[文章编号] 1000-2782(2001)06-099-05

七星农场示范区处于三江平原的腹地。在三江平原农业综合开发、建设中, 水资源尤其是地下水资源的开发、利用是当地的农业可持续发展的前提和保证^[1]。进入90年代中期以来, 随着人们生活水平由温饱型向小康型的迈进, 对稻米的需求量逐年增加, 再加上当地地表水资源相对较少, 为了扩大水稻的种植面积, 满足人们对稻米的需求, 故促进了当地打井种稻的发展, 到1998年底, 已有水稻面积2.3万 hm^2 , 其中井灌水稻占99%以上。但由于井水温度过低, 对水稻生长极为不利, 严重影响产量及米的品质^[2]。如何防御水稻冷水害已成为目前水稻生产面临的一个新课题。对水稻防御冷水害的试验研究尚未见详细报道。本研究通过太阳辐射-水体-土壤这一连续体, 对晒水池升温机理进行了初步研究, 以期井灌水稻的发展提供基础理论依据。

1 晒水池的升温机理

利用井水灌溉, 最大的缺点是水温低(4.5~7.2), 与水稻要求的适宜水温25~30相距甚远。为了防止冷水灌溉水稻引起水稻冷水害的发生, 多年的实践经验表明, 需设晒水池等水利措施来增温, 尽量提高井水入田前的水温。晒水池一般指深度小于1m的方形蓄水池。

1.1 静水情况下晒水池的升温机理

从太阳辐射-水体-土壤的连续体中可以看出, 晒水池水体的水温主要取决于太阳有效辐射、水体

及土壤之间的热交换。晒水池升温模式如图1所示。

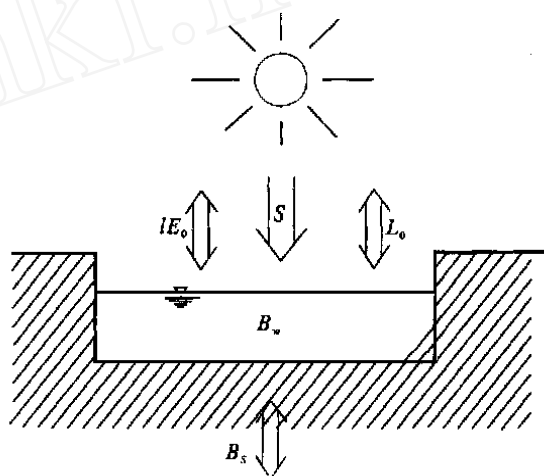


图1 作用在静态晒水池上的热平衡项

Fig 1 The heat balance item acting on sunning water pool in static state

从图1中可知, 水温的升高主要来自于太阳短波辐射的有效纯辐射, 而有效纯辐射主要取决于显热传导量、潜热传导量、水层贮热量及地中传导量。以水深为 H 、底面积为单位面积的水柱为研究对象, 热平衡方程^[3]为

$$S = L_0 + lE_0 + B_w + B_s \quad (1)$$

式中, S 为纯辐射量; L_0 为显热传导量; lE_0 为潜热传导量, 其中 E_0 为水面蒸发量, l 为蒸发潜热; B_w 为水层贮热量; B_s 为地中传导量。纯辐射(S)从空气到

[收稿日期] 2000-11-29

[基金项目] 四川大学青年基金资助项目(4320405); 中国博士后科学基金资助项目

[作者简介] 门宝辉(1973-), 男, 黑龙江绥化人, 博士, 主要从事节水灌溉、井灌水稻冷水害防御及水文、水资源、水环境资源开发利用与保护等的研究。

水面时取正;显、潜热传导量(L_0 , IE_0)从水面到空气时取正;水层贮热量(B_w)在水温上升时取正;地中传导量(B_s)在从水层到地中时取正。为了弄清楚水温的形成与那些因素有关,下面将(1)式右边各项用详细的形式表示出来。

1.1.1 显热传导量(L_0) 显热传导量(L_0)是与大气的热交换(也叫感热传导),一般情况下,显热传导量和水层温度及气温的温度差成正比,即写成下式^[3]:

$$L_0 = h(t_w - t_a) \quad (2)$$

式中, h 为感热传导系数($J/(m^2 \cdot s)$); t_w 为水温($^{\circ}C$); t_a 为 1.5 m 处的气温($^{\circ}C$)。

1.1.2 潜热传导量(IE_0) 潜热传导量(IE_0)是因蒸发(E_0)而引起的热耗损。同理,潜热传导量也可用同样式子表示:

$$IE_0 = k\{e(t_w) - e_a\} \quad (3)$$

式中, k 为潜热传导系数($J/(m^2 \cdot s)$), 一般情况下,假设热和水汽的乱流扩散系数是相等的,即 $k \approx 2h$; $e(t_w)$ 为 t_w 水温下的饱和水蒸气压力; e_a 为 1.5 m 处空气中水蒸气压力。

饱和水蒸气压力和温度的关系是一个复杂的函数,当水温和气温之差在 10 $^{\circ}C$ 以下时,可以近似地用直线表示:

$$e(t_w) = e(t_a) + \varphi(t_w - t_a) \quad (4)$$

式中, $e(t_a)$ 为 t_a 气温下饱和水蒸气压力; φ 为饱和水蒸气压力温度曲线对气温的变化率。

1.1.3 水层贮热量(B_w) 单位面积、深度为 H (m)的水层中贮存的热量等于一定时间内的水温变化乘以水层的热容量^[3]。即

$$B_w = c\rho H \frac{dt_w}{d\tau} \quad (5)$$

式中, $c\rho$ 为水的容积热容量($J/(^{\circ}C \cdot m^3)$); $\frac{dt_w}{d\tau}$ 水温变化($^{\circ}C/s$)。

1.1.4 地中传导量(B_s) 地中传导量和其他热平衡项比较,其量很小,可以忽略不计,即 $B_w = 0$ 。将(2~5)式代入水层热平衡式(1)中,得到晒水池水温的数学模型:

$$\frac{dt_w}{d\tau} + \frac{h(1+2\varphi)}{c\rho H} t_w = \frac{S + ht_a(1+2\varphi) - 2hd}{c\rho H} \quad (6)$$

式中, d 为饱和差,其他符号意义同前。

根据经验,给予水层的纯辐射和向空气中放热项之间达到平衡时,水温是不变的,这时的水温就是平衡水温。即 $\frac{dt_w}{d\tau} = 0$, 由(6)式得平衡水温 t_{∞} 为

$$t_{\infty} = t_a + \frac{S/h - 2d}{(1+2\varphi)} \quad (7)$$

由(7)式可知,平衡水温即晒水池(深度小于 1 m)的日平均水温取决于气温(t_a)、净辐射(S)、显热传导系数(h)、饱和差(d)和 φ 即由 5 个气象因素组成。在这些要素中,气温可以从当地的气象资料中获得,而其他要素在一般的气象资料中不能直接获得。

1.2 水温计算中各要素的求值方法

1.2.1 净辐射(S) 对水温变化的有效辐射热是吸收的辐射热与放出的辐射热之间的差额。作用于晒水池上的辐射热平衡项如图 2 所示。

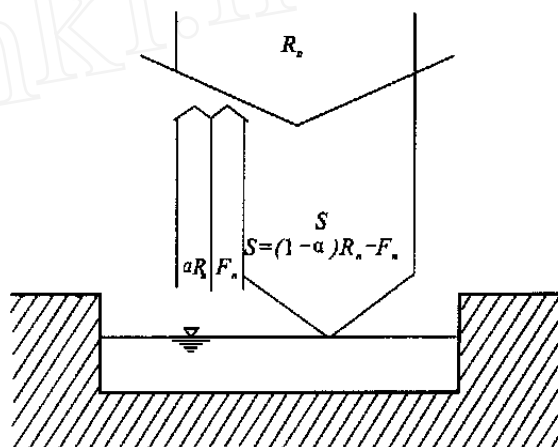


图 2 作用在浅水晒水池上的辐射热平衡项

Fig 2 The radiate heat balance item acting on the shallow sunning water pool

由图 2 可以看出,来自于太阳的全短波辐射中,一部分在水面发生镜面反射,其余大部分被水体吸收;另外由于空气中的水蒸气、二氧化碳等气体折射的长波(波长在 4 μm 以上)到达水面,水面也在水温变化的同时向空气中释放出长波辐射,一般情况下水面以长波辐射形式放出的热量,称为有效辐射。因此,对水温变化的有效纯辐射为到达全短波放射和反射短波辐射及有效辐射的差额,可以表示为:

$$S = (1 - \alpha)R_n - F_n \quad (8)$$

所以,为了求出作用在水面上的净辐射,就必须知道到达全短波辐射(R_n)、反射短波辐射(αR_n)、有效辐射(F_n)这 3 个量。

(1) 到达全短波辐射 (R_n)。没有云的完全晴天 其值见表 1。
时, 到达全短波辐射 (R_0) 可以由大气的透过度求出,

表 1 完全晴天时的月间短波辐射量^[4]
Table 1 The short wave radiation in a sunny day during a month $J/(m^2 \cdot s)$

纬度(北)/(°) Latitude (North)	月 份Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
50	77.3	131.2	212.9	295.5	354.3	379.1	360.6	305.2	230.4	154.5	92.3	63.7
45	106.9	165.2	189.1	312.0	362.6	382.5	365.0	321.7	252.2	183.2	124.4	93.8
40	140.9	195.4	261.5	324.6	368.9	383.9	375.2	329.5	271.7	210.4	154.5	126.4

实际上, 由于空中云的存在, 太阳辐射有时被遮挡, 有时被吸收, 所以, 每天到达水面的全短波辐射量比完全晴天时要少。其大小与云量和云形有明显的关系, 一般采用与平均云量的关系, 即如下所示:

$$R_n = R_0(1 - 0.37n - 0.38n^2)^{[3]} \quad (9)$$

式中, R_0, R_n 为完全晴天和云天时到达全短波辐射量 ($J/(m^2 \cdot s)$); n 为平均云量 ($0 \sim 1.0$)。

(2) 反射短波辐射 (αR_n)。到达全短波辐射经过云层时, 一部分经云层反射或吸收, 另一部分到达水面, 但并不是到达的短波辐射全部被水层所吸收, 而

是其中一部分再次被反射回空气中, 反射到空气中的全短波辐射, 被称为反射短波辐射, 它与到达的全短波辐射量成线性比例关系, 即:

$$\text{反射短波放射} = \alpha R_n \quad (10)$$

式中, α 被称为水面平均反射率 ($\alpha = 0 \sim 1.0$)。 α 与纬度、季节的关系如表 2 所示。

从以上所述可知, 水面吸收的全短波辐射量可以表示成如下形式:

$$\text{吸收短波辐射} = (1 - \alpha) R_n \quad (11)$$

表 2 水面的平均反射率 (α) 与纬度、季节的关系
Table 2 The relation table between the average reflect rate, latitude and season

纬度(北)/(°) Latitude (North)	月 份Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
50	0.13	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.14	0.15
40	0.11	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.11	0.12
30	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09

(3) 有效辐射 (F_n)^[5]。晴天有效辐射量 (F_0) 和地面附近 1.5 m 高处的气温及水蒸气压力有密切的关系, 可以表示成如下形式

$$F_0 = \sigma \delta T_a^4 (0.39 - 0.058 \sqrt{e_a}) \quad (12)$$

式中, δ 为水面的射出率 ($\delta = 0.98$); σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.72 \times 10^{-8} (J/(m^2 \cdot s \cdot K^4))$; T_a 为绝对气温, $T_a = 273 + t_a$; t_a 为气温 ($^{\circ}C$); e_a 为空气中的水蒸气压力; $e_a = e(t_a) \times r$, $e(t_a)$ 为饱和水蒸气压力, r 为相对湿度。

云量和云状对地面有效辐射均有显著影响。通常云量愈少, 大气逆辐射愈多, 则地面有效辐射愈强; 相反, 云量愈多, 云层愈厚, 地面有效辐射愈弱^[5]。通常情况下云天时的有效辐射 (F_n) 与晴天时的有效辐射 (F_0) 有以下关系:

$$F_n = F_0(1 - 0.71n^2) \quad (13)$$

式中, F_n 为云量为 n ($0 \sim 1.0$) 时的有效辐射量 ($J/(m^2 \cdot s)$)。

1.2.2 显热传导系数 (h) 为了求出水面和空气间

热收支关系系数, 即显热传导系数 (h), 进行了一些初步研究, 得到其平均值大约为 $8.4 J/(m^2 \cdot s)$, 这个值随着风速而变化, 可以表示成如下形式

$$h = 1.008 + 2.1V_{10} \quad (14)$$

式中, V_{10} 为离地面 10 m 高处的风速 (m/s), 可由气象资料得到。

1.2.3 饱和差 (d) 饱和差为某一气温下的饱和水蒸气压力和当地空气中水蒸气压力的差值。若采用干湿球温度计求出的相对湿度 (r) ($0 \sim 1.0$), 则可以表示成如下形式

$$\text{饱和差 } d = (1 - r) \cdot e(t_a) \quad (15)$$

式中, $e(t_a)$ 为饱和水蒸气压力。

1.2.4 饱和水蒸气压力曲线的变化率 (φ) 根据气温可以查表求得 φ 值。

1.3 动水情况下晒水池的升温机理

1.3.1 动水情况下晒水池内水温公式的推导 此种情况和静水情况下晒水池不同的是, 由于流入的水将热量带入到池内, 流出的水将热量带走, 这样作

用在晒水池上的热平衡项就多了流入项($B'_{w入}$)、流出项($B'_{w出}$), 用图 3 表示。

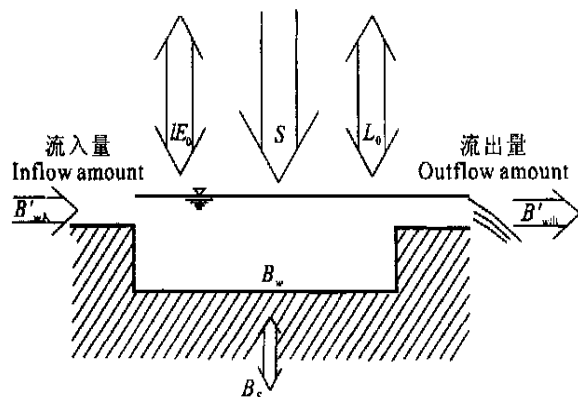


图 3 作用在动态水的晒水池上的热平衡项

Fig 3 The heat balance item acting on sunning water pool in dynamic state

在图 3 中, 取单位底面积, 深度为 H 的水柱为研究对象, 设其进口水温为 t_{w1} , 出口水温为 t_{w2} , 根据公式(1~ 5)得该水柱的热平衡方程为:

$$= h \left(\frac{t_{w1} - t_{w2}}{2} - t_a \right) + 2h \left[d + Q \left(\frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} - t_a \right) \right] + c\rho H \frac{dt_{w1}}{d\tau} + c\rho H \frac{dt_{w2}}{d\tau}$$

整理上式得:

$$\frac{S}{2} = \frac{h}{2} (t_{w1} - t_a) + h[d + Q(t_{w1} - t_a)] + c\rho H \frac{dt_{w1}}{d\tau}$$

$$\frac{S}{2} = \frac{h}{2} (t_{w2} - t_a) + h[d + Q(t_{w2} - t_a)] + c\rho H \frac{dt_{w2}}{d\tau}$$

表 3 晒水池动水情况下水温实测值与计算值对照及相对误差分析表

Fig 3 The comparison between survey value and calculating value and relative error analysis table for the water temperature of sunning water pool in dynamic state

测点距/m Range finding	17.4, 云量 0.02, 天气晴 17.4, cloudiness 0.02, fine			20.3, 云量 0.2, 天气晴 20.3, cloudiness 0.2, fine			21.6, 云量 0.2, 天气晴 21.6, cloudiness 0.2, fine		
	实测值 Survey value	预测值 Calculating value	相对误差 Relative error	实测值 Survey value	预测值 Calculating value	相对误差 Relative error	实测值 Survey value	预测值 Calculating value	相对误差 Relative error
60	7.6	7.84	3.1	8.0	7.95	0.1	7.8	8.02	2.7
110	8.8	8.35	5.4	8.9	8.56	4.0	9.5	8.68	9.4
160	9.2	8.84	4.1	9.8	9.13	7.3	10.1	9.31	8.5
210	9.5	9.32	1.9	10.2	9.69	5.3	10.8	9.92	8.9
测点距/m Range finding	25.3, 云量 0.7, 天气晴 25.3, cloudiness 0.7, fine			22.4, 云量 0.3, 天气晴 22.4, cloudiness 0.3, fine					
	实测值 Survey value	预测值 Calculating value	相对误差 Relative error	实测值 Survey value	预测值 Calculating value	相对误差 Relative error			
60	7.4	8.12	8.9	8.1	8.05	0.1			
110	8.3	8.85	6.2	9.4	8.73	7.7			
160	9.0	9.55	5.8	9.7	9.38	3.4			
210	11.2	10.22	9.6	10.7	10.00	7.0			

注: 井的出口流量为 $210 \text{ m}^3/\text{h}$, $r = 71\%$, $V_{10} = 3.7 \text{ m/s}$

$$\text{即 } S = h(t_w - t_a) + 2h[d + Q(t_w - t_a)] + c\rho H \frac{dt_w}{d\tau}$$

可见, 此种情况与静水时形式上是一样的, 只是含义发生了变化, 此时的水是流动的, 水温随时间变化, 同时也与水的流入、流出有关。所以在这种情况下, 晒水池内经过时间 τ , 流经晒水池内各点的水温, 就可以通过解(6)式这一微分方程来获得。下面介绍一下求解这一微分方程的过程。

从(6)式的形式可以看出, (6)式是关于水温 t_w 的非齐次微分方程, 采用常数变易法求解非齐次微分方程得:

$$t_w = \frac{S + ht_a(1 + 2Q) - 2hd}{c\rho H} + c_2 \frac{c\rho H}{h(1 + 2Q)} \cdot e^{-\frac{h(1 + 2Q)}{c\rho H} \tau} \quad (16)$$

利用边界条件, 当 $\tau = 0$ 时, $t_w = t_0$, 得

$$c_2 = (t_0 - t_\infty) \cdot \frac{h(1 + 2Q)}{c\rho H}$$

$$\text{故 } t_w = t_\infty - (t_\infty - t_0) \cdot e^{-\frac{h(1 + 2Q)}{c\rho H} \tau} \quad (17)$$

1.3.2 动水情况下晒水池内水温公式的验证 为了验证(17)式即动水情况下晒水池内任意一点水温公式的正确与否, 利用实测资料对其进行误差分析, 计算结果见表 3。田间实测时间为 2000-09-07, 实测地点为七星农场示范区 ($210 \text{ m} \times 10 \text{ m}$) 晒水池, 表 3 中的实测水温为晒水池水下 25 cm 处的水温。计算过程采用 Borland C++ 3.1 编程^[6~9]。

Note: The flow rate at pithead of the well is $210 \text{ m}^3/\text{h}$, $r = 71\%$, $V_{10} = 3.7 \text{ m/s}$

从表3中的相对误差(最大相对误差为9.6%, 平均相对误差为5.47%)可以看出, 此预测模型所计算的数值与实测水温符合得较好, 符合预测水温的要求。

2 结束语

通过太阳辐射-水体-土壤这一连续体, 建立了

晒水池平衡水温模型, 同时给出了模型中各参数的数值计算方法。并利用解微分方程的方法, 得出了晒水池内任意点水温的预测公式, 应用实测数据进行了验证, 最大相对误差为9.6%, 预测精度满足要求。但由于知识水平有限, 在建立模型时, 忽略了水深对晒水池水温的影响。若能将这一因素考虑进去, 模型将会更加接近实际, 因而还需做进一步研究。

[参考文献]

- [1] 门宝辉. 井灌水稻防御冷水害的增温机理研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2001.
- [2] 门宝辉, 刘庆华. 井灌水稻防御冷水害试验研究综述[J]. 农业系统科学与综合研究, 2001, 17(1): 73-76.
- [3] 坪井八十二等编. 新编农业气象手册[M]. 北京: 农业出版社, 1985. 121-124.
- [4] 日本太阳能学会编. 太阳能的基础和应用[M]. 刘鉴民, 李安定等译. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.
- [5] 陈仲全, 邓先瑞. 太阳辐射与热能[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [6] 李伟. TurboC++图形设计技术与实例[M]. 北京: 北京希望公司, 1995.
- [7] 门宝辉, 黄金柏, 李树桥. 黄金分割法在渠道断面设计中的应用[J]. 东北农业大学学报, 2000, 31(3), 283-287.
- [8] 门宝辉. 渠道流量损失及水利利用系数公式的探讨[J]. 中国农村水利水电, 2000, (2): 33-34.
- [9] MEN Bao-hui, CHEN Ying-jie, LAN Jing-jun. The estimation method of channel quality[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2000, 7(1): 33-37.

The preliminary study on water temperature increasing at sunning water pool in well irrigation rice district

MEN Bao-hui¹, FU Qiang¹, LIU Qing-hua², WEI Yong-xia²

(1 Hydroelectric College, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

2 Hydroelectric and Architecture College, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: Oriented towards the characteristic of the low temperature well water for rice irrigation in well irrigation district, the sunning water pool is usually set up to increase the water temperature, and prevent cold water harm of well irrigation rice from taking place in field production process. According to the continuation model of solar radiation-water-soil and the method of solving differential equation, the increasing temperature mechanism is researched under the static water circumstances in sunning water pool, meanwhile, the balanced water temperature mathematics model is built up under the static water surroundings. The paper brings forward the calculation method for parameters in sunning water pool under the calm water surroundings. The model for forecasting the increasing water temperature is built up in sunning water pool under dynamic state water circumstances and it is tested and verified by actually surveyed water temperature, the result of which is conformed finely to actually surveyed data, the biggest calculate relative error is only 9.6 percent.

Key words: well irrigation rice; sunning water pool; cold water harm; solar radiation