



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112840887 A

(43) 申请公布日 2021.05.28

(21) 申请号 202110013562.X

(22) 申请日 2021.01.06

(71) 申请人 安徽省农业科学院水稻研究所

地址 230031 安徽省合肥市农科南路40号

申请人 安徽信安通讯技术有限公司

(72) 发明人 杜士云 李泽福 刘银燕 王辉

王玉 马廷臣 王伍梅

(74) 专利代理机构 北京庚致知识产权代理事务

所(特殊普通合伙) 11807

代理人 李晓辉 李伟波

(51) Int.Cl.

A01G 7/04 (2006.01)

A01G 9/24 (2006.01)

G06F 17/11 (2006.01)

权利要求书5页 说明书17页 附图2页

(54) 发明名称

农作物人工气候室的补光方法

(57) 摘要

本公开提供一种农作物人工气候室的补光方法,其包括:建立农作物人工气候室的能量方程,根据所述能量方程,调节照射入农作物人工气候室的光照,使得农作物人工气候室内部的农作物床的受照光合作用光谱能量与室外的农作物床的受照光合作用光谱能量相同,并使得所述农作物人工气候室内部处于预设温度内;其中,所述的农作物人工气候室的单位时间能量方程为: $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_{p1} -$

$Q_{p2} - Q_p \mp Q_k \pm Q_m = 0$ 。

建立农作物人工气候室的能量方程



根据所述能量方程,调节照射入农作物人工气候室的光照,使得农作物人工气候室内部的农作物床的受照光合作用光谱能量与室外的农作物床的受照光合作用光谱能量相同,并使得所述农作物人工气候室内部处于预设温度内

1. 一种农作物人工气候室的补光方法,其特征在于,包括:

建立农作物人工气候室的能量方程,

根据所述能量方程,调节照射入农作物人工气候室的光照,使得农作物人工气候室内部的农作物床的受照光合作用光谱能量与室外的农作物床的受照光合作用光谱能量相同,并使得所述农作物人工气候室内部处于预设温度内;

其中,所述的农作物人工气候室的单位时间能量方程为:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_{p1} - Q_{p2} - Q_p \mp Q_k \pm Q_m = 0;$$

所述能量方程中,正号为能量输入,负号为能量消耗,单位均为W; Q_1 为输入到农作物人工气候室内的太阳能; Q_2 为补偿光灯消耗的电能量; Q_3 为农作物人工气候室内气流均匀化的附加风机消耗的电能量; Q_4 为玻璃罩对室内的传热量; Q_{p1} 、 Q_{p2} 为农作物床吸收的太阳光和补偿光中的光合作用能量; Q_p 是作物床反射到室外的辐射能量; $\mp Q_k$ 为空调机循环风送给农作物人工气候室冷量或热量,当输入热量时为正号,输入冷量时为负号; $\pm Q_m$ 为农作物人工气候室内的室内空气热容、作物床植株热容和根系土壤的热容吸热或放热量,吸热为负号,放热为正号。

2. 如权利要求1所述的农作物人工气候室的补光方法,其特征在于,当所述农作物人工气候室在未被遮挡时:

$$Q_1 = G_{in,\theta} A_0 = G_{out,\theta} \tau A_0 = (G_b \cos \theta + G_d) \tau A_0$$

其中, $G_{in,\theta}$ 和 $G_{out,\theta}$ 分别为农作物人工气候室内部和外部的水平面受到太阳辐照强度,单位为 W/m^2 , θ 表示太阳光线的天顶角; τ 为玻璃的平均透光率; A_0 为农作物人工气候室农作物床的面积,单位为 m^2 ; G_b 为直射太阳辐射强度; G_d 为散射太阳辐射强度;取 $G_b/G_d=6/4$ 。

3. 如权利要求2所述的农作物人工气候室的补光方法,其特征在于,当所述农作物人工气候室使用顶棚遮光网时: Q_1 记为 $Q_{1,\pi}$,

$$Q_{1,\pi} = [G_{out,\theta,b} (1 - \pi_b) + G_d (1 - \pi_{F_{21}})] \tau A_0 \quad (4)$$

其中, $G_{out,\theta,b}$ 为无遮光时太阳入射角为 θ 的太阳直射辐射能; π_b 为遮光网减少的直射辐射能的份额,等于作物床被遮光网遮挡的直射太阳照射面积份额与遮光网的遮光度 π 的乘积;当遮光网顶棚与作物床平行高度为 Z ,作物床宽度为 x_b ,遮光网宽度为 x_z ,从遮光网顶棚左端射到作物床的右端光线 L_a 的天顶角为 θ_a ,从遮光网顶棚左端射到作物床的左端光线 L_b 的天顶角为 θ_b 时;

当 $\theta \geq \theta_a$ 时没有作用,

$$\pi_b = 0 \quad (\theta \geq \theta_a) \quad (5a)$$

当 $\theta < \theta_a$ 以后,随 θ 的继续减小,在作物床上出现遮光网的阴影面积,天顶角为 θ 的光线 L_a 在作物床上产生的阴影宽度用 x_π 表示,

$$x_\pi = Z \tan \theta_a - Z \tan \theta = x_a - x_\theta$$

$$x_a = Z \tan \theta_a, x_\theta = Z \tan \theta, x_b = Z \tan \theta_b;$$

$$\pi_b = \left(\frac{x_a - x_\theta}{x_b} \right) \pi \quad (\theta_b \leq \theta \leq \theta_a) \quad (5b)$$

当 $\theta_b > \theta$ 后

$$\pi_b = \pi \quad (5c)$$

式(4)的散射辐射能 $G_d(1-\pi F_{21})$ 中的 πF_{21} 为遮光网在半球空间辐射中占有的份额, F_{21} 视觉系数为作物床平面所拦截的从遮光网顶棚面来的辐射份额;

根据太阳高度不同,天顶角 θ 不同,选择式(5a)或(5b)或(5c)代入式(4),计算有遮光时进入农作物人工气候室的太阳辐射能 $Q_{1,\pi}$;

当 $\theta=0$ 时,

$$Q_{1,\pi,\theta=0} = [G_{out,\theta,b}(1-\pi) + G_d(1-\pi F_{21})] \tau A_0 \quad (\theta=0) \quad (4a)。$$

4.如权利要求3所述的农作物人工气候室的补光方法,其特征在于,当采用铺设于农作物人工气候室顶层玻璃上面的红外反射半透明膜时, Q_1 记为 Q_{1,π_p} ,可见光的遮光度为 $\pi_p=0.1$,可见光能量在太阳全辐射能中所占的份额为 $\varphi_{VL}=0.4729$;红外辐射反射膜的对波长 $\lambda \geq 780\text{nm}$ 的红外光辐射遮光度为 $\pi_h=0.9$,波长 $\lambda \geq 780\text{nm}$ 的红外光辐射能在太阳全辐射能中所占的份额为 $\varphi_{IR}=0.5271$;

当采用顶层红外反射半透明膜时,太阳直射辐射能和散射辐射能分解为可见光和红外辐射两部分能量,并分别使用不同的遮光率 π_p 和 π_h ,使用红外反射半透明膜时,进入作物人工实验室的太阳辐射能为:

$$Q_{1,\pi_p} = [\varphi_{VL}(1-\pi_{b,p})G_b \cos \theta + \varphi_{IR}(1-\pi_{b,h})G_b \cos \theta + \varphi_{VL}G_d(1-\pi_p F_{21}) + \varphi_{IR}G_d(1-\pi_h F_{21})] \tau A_0 \quad (6)$$

式(6)按可见光部和红外辐射整理,得:

$$Q_{1,\pi_p} = \varphi_{VL}[G_b \cos \theta (1-\pi_{b,p}) + G_d(1-\pi_p F_{21})] \tau A_0 + \varphi_{IR}[G_b \cos \theta (1-\pi_{b,h}) + G_d(1-\pi_h F_{21})] \tau A_0 \quad (7)$$

当正午 $\theta=0$ 时, $\cos \theta=1$,记 $\pi_{b,p}=\pi_p$, $\pi_{b,h}=\pi_h$,所以式(7)化作(7a)或(7b):

$$Q_{1,\pi_p,\theta=0} = [\varphi_{VL}(1-\pi_p)G_b + \varphi_{IR}(1-\pi_h)G_b + \varphi_{VL}G_d(1-\pi_p F_{21}) + \varphi_{IR}G_d(1-\pi_h F_{21})] \tau A_0 \quad (7a) \text{或}$$

$$Q_{1,\pi_p,\theta=0} = [G_{out} - (\varphi_{VL}\pi_p + \varphi_{IR}\pi_h)(G_b + G_d F_{21})] \tau A_0 \quad (\theta=0) \quad (7b);$$

其中,可见光的入室能量为:

$$Q_{1,\pi_p,\theta=0,\varphi_{VL}} = [\varphi_{VL}(1-\pi_p)G_b + \varphi_{VL}G_d(1-\pi_p F_{21})] \tau A_0 \quad (\theta=0) \quad (8)$$

太阳红外辐射的入室能量为:

$$Q_{1,\pi_p,\theta=0,\varphi_{IR}} = [\varphi_{IR}(1-\pi_h)G_b + \varphi_{IR}G_d(1-\pi_h F_{21})] \tau A_0 \quad (\theta=0) \quad (9)$$

与无遮光方案相比,入室的太阳能量差值为:

$$Q_{1,\theta=0} - Q_{1,\pi_p,\theta=0} = [\varphi_p \pi_p (G_b + G_d F_{21}) + \varphi_h \pi_h (G_b + G_d F_{21})] \tau A_0 \quad (10)$$

式(9)中,可见光减少量为:

$$\Delta Q_{VL} = \varphi_{VL} \pi_p (G_b + G_d F_{21}) \tau A_0 \quad (11)$$

远红外辐射能减少量:

$$\Delta Q_{IR} = \varphi_{IR} \pi_h (G_b + G_d F_{21}) \tau A_0 \quad (12)$$

与遮光网方案相比,入室的太阳辐射能量差值为:

$$Q_{1,\theta=0} - Q_{1,\pi_p,\theta=0} = [\varphi_{VL} (\pi_p - \pi) (G_b + G_d F_{21}) + \varphi_{IR} (\pi_h - \pi) (G_b + G_d F_{21})] \tau A_0 \quad (13)$$

遮光网方案的可见光偏少量为:

$$\Delta Q_{\pi,VL} = [\varphi_{VL} (\pi_p - \pi) (G_b + G_d F_{21})] \tau A_0 \quad (14)$$

扣除绿光份额后,遮光网方案的作物光合作用辐射能偏少量为:

$$\Delta Q_{\pi,p} = \varphi_p \Delta Q_{\pi,VL} / \varphi_{VL} \quad (15)$$

减少补光灯的电功率为:

$$\Delta P_{2,\pi-p} = \Delta Q_{\pi,VL} / \eta_d \quad (16)$$

但是远红外辐射能增加量:

$$\Delta Q_{\pi,IR} = [\varphi_{IR} (\pi_h - \pi) (G_b + G_d F_{21})] \tau A_0 \quad (17)$$

绿光辐射能比遮光网的增多量为:

$$\Delta Q_{\pi,\rho} = [\varphi_\rho (\pi_h - \pi) (G_b + G_d F_{21})] \tau A_0 \quad (18)$$

按空调机性能系数COP计算,红外反射遮光膜的方案比遮光网的方案节省电功率为:

$$\Delta P_{2,\pi-p} = \Delta P_{2,\pi-p} - (\Delta Q_{\pi,IR} - \Delta Q_{\pi,\rho}) / COP \quad (19)$$

5. 如权利要求4所述的农作物人工气候室的补光方法,其特征在于,

农作物床的作物从太阳光吸收的光合作用的能量 Q_{p1} 为:

$$Q_{p1} = \varphi_p Q_1 \alpha_p \xi \quad (20)$$

其中,记 φ_p 为太阳光中可被植物吸收的光合作用的能量份额, α_p 为植物的对光合作用光谱辐射能的吸收率, ξ 为光合作用从光能变成化学能的效率;

在正午,无遮光时:

$$Q_{p1,\theta=0} = \varphi_p Q_1 \alpha_p \xi \quad (20a)$$

在使用遮光网时:

$$Q_{p1,\pi,\theta=0} = \varphi_p Q_{1,\pi,\theta=0} \alpha_p \xi \quad (20b)$$

在使用红外反射遮光膜时:

$$Q_{p1,\pi_p,\theta=0} = \frac{\varphi_p}{\varphi_{VL}} Q_{1,\pi_p,\theta=0,\varphi_{VL}} \alpha_p \xi \quad (20c)。$$

6. 如权利要求5所述的农作物人工气候室的补光方法,其特征在于,能量方程的补偿光中的光合作用光谱能量 Q_{p2} 为室外、内的可见光光谱段的能量差,在无遮光时:

$$Q_{p2} = Q_2 \eta_d \alpha_p \xi = \alpha_p \xi \varphi_p (Q_{out,0} - Q_1) = \alpha_p \xi \varphi_p Q_{out,0} (1 - \tau) A_0 \quad (23)$$

补光灯的功率为:

$$Q_2 = Q_{p2} / \alpha_p \xi \eta_d = \varphi_p (Q_{out,0} - Q_1) / \eta_d \quad (24)$$

其中, η_d 为补偿光灯的电光转化效率;

在无遮光且正午 $\theta=0$ 时的补偿光灯的能量 $Q_{2,\theta=0}$ 、被作物吸收的光合作用能量记作 $Q_{p2,\theta=0}$:

$$Q_{2,\theta=0} = \varphi_p (Q_{out,0} - Q_1) / \eta_d \quad (24a)$$

$$Q_{2,\pi,\theta=0} = \varphi_p (Q_{out,0} - Q_{p1,\pi,\theta=0}) / \eta_d \quad (23a)$$

在采用顶棚遮光网 $\theta=0$ 时, Q_1 采用式(4)的 $Q_{1,\pi}$ 计算, Q_2 记作 $Q_{2,\pi}$, Q_{p2} 记作 $Q_{p2,\pi}$,则:

$$Q_{2,\pi,\theta=0} = \varphi_p (Q_{out,0} - Q_{p1,\pi,\theta=0}) / \eta_d \quad (24b)$$

$$Q_{p2,\pi} = (G_{out,\theta,b} \pi_b + G_d \pi F_{21}) \tau A_0 \quad (23b)$$

在采用红外反射遮光膜时,且正午时的补偿光功率 $Q_{2,\pi_p,\theta=0}$ 和被农作物吸收的能量

$Q_{p2,\pi_p,\theta=0}$:

$$Q_{2,\pi_p,\theta=0} = \left(\varphi_p Q_{out,0} - \frac{\varphi_p}{\varphi_{VL}} Q_{1,\pi_p,\theta=0,\varphi_{VL}} \right) / \eta_d \quad (24c)$$

$$Q_{p2,\pi_p,\theta=0} = \eta_d Q_{2,\pi_p,\theta=0} \alpha \xi \quad (23c);$$

其中, $Q_{out,0}$ 取100。

7. 如权利要求6所述的农作物人工气候室的补光方法,其特征在于,农作物人工气候室反射的辐射能 Q_ρ 为:

$$Q_\rho = \varphi_g Q_{in} \quad (25)$$

其中, $\varphi_g = 8.05\%$;

当无遮光 $\theta=0$ 时的绿光反射量,记作 $Q_{\rho,\theta=0}$;

$$Q_{\rho,\theta=0} = \varphi_g Q_{1,\theta=0} = \varphi_g G_{out} (a_t \cos \theta + a_d) \tau A_0 \quad (25a)$$

当顶层采用遮光网遮光且 $\theta=0$,遮光网的遮光度 $\pi=0.6$ 时的绿光反射量,记作 $Q_{\rho,\theta=0,\pi=0.6}$;

$$Q_{\rho,\theta=0,\pi=0.6} = \varphi_g Q_{1,\theta=0,\pi} \quad (25b)$$

当采用红外反射遮光膜时,可见光遮光度为 $\pi_p=0.1$,红外遮光度为 $\pi_{p,h}$, $\theta=0$ 时的绿光反射量,记作 $Q_{\rho,\theta=0,\pi=0.1}$,

$$Q_{\rho, \theta=0, \pi=0.1} = \varphi_g Q_{1, \theta=0} = \varphi_g G_{out} (a_t \cos \theta + a_d) (\tau - 0.1) A_0 \quad (25c);$$

其中 a_t 取0.6, a_d 取0.4, $G_{out} = G_b + G_d$ 。

8. 如权利要求7所述的农作物人工气候室的补光方法, 其特征在于, 所述能量方程中的 Q_4 为玻璃罩对室内的传热量:

在白天:

$$Q_4 = 0.5 G_{out} (1 - \tau - \rho) A_0 = 0.5 (G_b \cos \theta + G_d) \alpha A_0 \quad (26)$$

当正午太阳天顶角 $\theta = 0^\circ$ 时,

$$Q_4 = 0.5 (G_b + G_d) (1 - \tau) A_0 = 0.5 G_{out} (1 - \tau - \rho) A_0 \quad (26a)$$

夜晚没有太阳辐射, 则

$$Q_4 = KA (T_{g1} - T) = KA (T_{out} - T_{g2}) \quad (27)$$

式中 K 为玻璃壁对空气的平均传热系数, A 为玻璃房的玻璃壁面积, T_{g1} 、 T_{g2} 分别为室内、外侧玻璃温度, T 、 T_{out} 分别为室内、外空气温度。

9. 如权利要求8所述的农作物人工气候室的补光方法, 其特征在于, 农作物人工气候室的热容吸热或放热量 Q_m :

$$Q_m = M_a c_a dT_a/dt + M_f c_f dT_f/dt + M_s c_s dT_s/dt \quad (28)$$

式中的 M_a 、 M_f 、 M_s 分别为农作物人工气候室内的空气、作物床秸秆、作物床的植物根系土壤的质量, $M_a \approx M_f \ll M_s$, 所以 $M_s c_s$ 的热容是农作物人工气候室的热沉, 其温度变化不敏感, 当植物根系土壤温度达到设定值后, 温度控制只要保留空气和作物床植株的热容波动项; dT_a/dt 、 dT_f/dt 、 dT_s/dt 分别为室内空气平均气温、作物床秸秆平均温度、作物床的植物根系土壤平均温度的变化速率;

当农作物人工气候室的室内空气温度控制要求30分钟内允许波动 1°C , 植株和空气的热容基本相同, Q_m 通过下式获得:

$$Q_m = (M_{af} c_{af}) dT_a/dt \quad (29)$$

其中 $M_{af} c_{af} = M_a c_a + M_f c_f$ 。

10. 如权利要求9所述的农作物人工气候室的补光方法, 其特征在于, 空调机循环风送给农作物人工气候室冷量或冷量 $\pm Q_k$:

$$\pm Q_k = m_a c_a (t_h - t_c) = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_{p1} - Q_{p2} - Q_p \pm Q_m \quad (30)$$

其中, m_a 为循环风的质量流量, kg/s ; c_a 为空气比热; t_h 为农作物人工气候室循环空调风进入换热器前的来自农作物人工气候室的回风温度或是回风与新风混合的风温, 回风口布置在农作物人工气候室作物床的近地面部位; t_c 为循环空调风在送风口进入农作物人工气候室前的气温, 送风口布置在农作物人工气候室上方靠近顶面;

当 $t_h > t_c$ 送冷风, 当 $t_h < t_c$ 送热风。

农作物人工气候室的补光方法

技术领域

[0001] 本公开涉及一种农作物人工气候室的补光方法,属于农作物人工栽培技术领域。

背景技术

[0002] 近年来,极度天气频发,其中高温热害对水稻生产造成严重影响,因此,鉴定水稻耐热性的农作物人工气候室是水稻选育种的必要设施之一。

[0003] 不同水稻品种对高温敏感性不同,耐热和不耐热品种之间花器官及生理特性差异显著;筛选鉴定耐热性水稻品种,对保障粮食安全具有重要意义;因此迫切需要建设满足水稻耐热性鉴定需求的水稻人工栽培实验室,即建设水稻耐热性鉴定农作物人工气候室。

[0004] 水稻耐热性鉴定农作物人工气候室一般是玻璃实验房,玻璃实验房要模拟自然高温恶劣条件,对光照、温度、湿度、通风都有很严格要求,需要安装制冷/热泵设备、空气循环系统对玻璃实验房内的热量进行调节,控制合适的温度和湿度;太阳辐射是玻璃实验房的主要而又不稳定的热源,对制冷/热泵的热负荷大小和室内温度调控精度影响很大,并直接影响作物的生长、开花、结实;农作物人工气候室的温度调控需要消耗能量,特别是在日晒的玻璃房实验室内的温度调控,需要热分析的理论指导,还要考虑节能等实际情况。

[0005] 目前,农作物人工气候室的光、热分析缺乏理论指导,农作物人工气候室能量分析应当包括热平衡分析和光合作用平衡分析,但是目前欠缺兼顾光、热两方面分析文章;其原因也许是农科院农作物栽培人员缺乏热物理领域知识,而热物理领域技术人员也不了解农作物人工气候室的状况;热工技术人员仅仅采用房间空调的能量平衡分析方法,是不能正确分析农作物人工气候室的能量平衡情况。

[0006] 对于太阳辐射影响农作物人工气候室热负荷的节能调控手段之一是采用遮阳措施,在阳光强烈的时候用遮光网减少太阳入射面积,这措施节能是有效的;但是,遮光后作物的光合作用能量减少,会影响作物的开花结实;有遮光的热分析如何进行,怎样设计遮光系统怎样设计,遮光度是多少合理,缺乏理论分析指导。

[0007] 近来,对于人工光源代替自然光源,促进作为生长,进行了许多研究,有文献介绍其中波长在620nm-750nm的红光,叶绿素能吸收75%-85%,该波段波长的红光对植物(种子)发芽,开花,结果,植物体叶绿素的合成,光和作用等有促进作用;波长在420nm-500nm的蓝紫光,叶绿素能吸收90%以上,是植物生长和光合作用很强的一个波段,它能促进作物根块发育、生长点降低,叶茎变粗;使作物强壮,抗病能力明显增强;而产生这些光谱的新型灯源是LED灯源。

[0008] LED灯的光源可作为水稻耐热性鉴定农作物人工气候室的补充光源。但是,目前自然光调节和补偿光调控都停留在经验基础上,没有系统的理论计算;缺乏自然光调节和补偿光的量化关系指导,难以实现自然光调节和补偿光智能节能匹配控制,也给农作物的农作物人工气候室的温度、湿度精准控制带来难度。

发明内容

[0009] 为了解决上述技术问题之一,本公开提供了一种农作物人工气候室的补光方法。

[0010] 根据本公开的一个方面,提供了一种农作物人工气候室的补光方法,其包括:

[0011] 建立农作物人工气候室的能量方程,

[0012] 根据所述能量方程,调节照射入农作物人工气候室的光照,使得农作物人工气候室内部的农作物床的受照光合作用光谱能量与室外的农作物床的受照光合作用光谱能量相同,并使得所述农作物人工气候室内部处于预设温度内;

[0013] 其中,所述的农作物人工气候室的单位时间能量方程为:

$$[0014] \quad Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_{p1} - Q_{p2} - Q_p \mp Q_k \pm Q_m = 0;$$

[0015] 所述能量方程中,正号为能量输入,负号为能量消耗,单位均为W; Q_1 为输入到农作物人工气候室内的太阳能; Q_2 为补偿光灯消耗的电能量; Q_3 为农作物人工气候室内气流均匀化的附加风机消耗的电能量; Q_4 为玻璃罩对室内的传热量; Q_{p1} 、 Q_{p2} 为农作物床吸收的太阳光和补偿光中的光合作用能量; Q_p 是作物床反射到室外的辐射能量; $\mp Q_k$ 为空调机循环风送给农作物人工气候室冷量或热量,当输入热量时为正号,输入冷量时为负号; $\pm Q_m$ 为农作物人工气候室内的室内空气热容、作物床植株热容和根系土壤的热容吸热或放热量,吸热为负号,放热为正号。

[0016] 根据本公开一个实施方式所述的农作物人工气候室的补光方法,当所述农作物人工气候室在未被遮挡时:

$$[0017] \quad Q_1 = G_{in,\theta} A_0 = G_{out,\theta} \tau A_0 = (G_b \cos \theta + G_d) \tau A_0$$

[0018] 其中, $G_{in,\theta}$ 和 $G_{out,\theta}$ 分别为农作物人工气候室内部和外部的水平面受到太阳辐照强度,单位为 W/m^2 , θ 表示太阳光线的天顶角; τ 为玻璃的平均透光率; A_0 为农作物人工气候室农作物床的面积,单位为 m^2 ; G_b 为直射太阳辐射强度; G_d 为散射太阳辐射强度;取 $G_b/G_d = 6/4$ 。

[0019] 根据本公开一个实施方式所述的农作物人工气候室的补光方法,当所述农作物人工气候室使用顶棚遮光网时: Q_1 记为 $Q_{1,\pi}$,

$$[0020] \quad Q_{1,\pi} = [G_{out,\theta,b} (1 - \pi_b) + G_d (1 - \pi F_{21})] \tau A_0 \quad (4)$$

[0021] 其中, $G_{out,\theta,b}$ 为无遮光时太阳入射角为 θ 的太阳直射辐射能; π_b 为遮光网减少的直射辐射能的份额,等于作物床被遮光网遮挡的直射太阳照射面积份额与遮光网的遮光度 π 的乘积;当遮光网顶棚与作物床平行高度为 Z ,作物床宽度为 x_b ,遮光网宽度为 x_z ,从遮光网顶棚左端射到作物床的右端光线 L_a 的天顶角为 θ_a ,从遮光网顶棚左端射到作物床的左端光线 L_b 的天顶角为 θ_b 时;

[0022] 当 $\theta \geq \theta_a$ 时没有作用,

$$[0023] \quad \pi_b = 0 \quad (\theta \geq \theta_a) \quad (5a)$$

[0024] 当 $\theta < \theta_a$ 以后,随 θ 的继续减小,在作物床上出现遮光网的阴影面积,天顶角为 θ 的光线 L_a 在作物床上产生的阴影宽度用 x_π 表示,

$$[0025] \quad x_\pi = Z \tan \theta_a - Z \tan \theta = x_a - x_\theta$$

$$[0026] \quad x_a = Z \tan \theta_a, x_\theta = Z \tan \theta, x_b = Z \tan \theta_b;$$

$$[0027] \quad \pi_b = \left(\frac{x_a - x_\theta}{x_b} \right) \pi \quad (\theta_b \leq \theta \leq \theta_a) \quad (5b)$$

[0028] 当 $\theta_b > \theta$ 后

[0029] $\pi_b = \pi$ (5c)

[0030] 式(4)的散射辐射能 $G_d(1 - \pi F_{21})$ 中的 πF_{21} 为遮光网在半球空间辐射中占有的份额, F_{21} 视觉系数为作物床平面所拦截的从遮光网顶棚面来的辐射份额;

[0031] 根据太阳高度不同,天顶角 θ 不同,选择式(5a)或(5b)或(5c)代入式(4),计算有遮光时进入农作物人工气候室的太阳辐射能 $Q_{1,\pi}$;

[0032] 当 $\theta = 0$ 时,

[0033] $Q_{1,\pi,\theta=0} = [G_{out,\theta,b}(1 - \pi) + G_d(1 - \pi F_{21})] \tau A_0$ ($\theta = 0$) (4a)。

[0034] 根据本公开一个实施方式所述的农作物人工气候室的补光方法,当采用铺设于农作物人工气候室顶层玻璃上面的红外反射半透明膜时, Q_1 记为 Q_{1,π_p} ,可见光的遮光度为 $\pi_p = 0.1$,可见光能量在太阳全辐射能中所占的份额为 $\varphi_{VL} = 0.4729$;红外辐射反射膜的对波长 $\lambda \geq 780\text{nm}$ 的红外光辐射遮光度为 $\pi_h = 0.9$,波长 $\lambda \geq 780\text{nm}$ 的红外光辐射能在太阳全辐射能中所占的份额为 $\varphi_{IR} = 0.5271$;

[0035] 当采用顶层红外反射半透明膜时,太阳直射辐射能和散射辐射能分解为可见光和红外辐射两部分能量,并分别使用不同的遮光率 π_p 和 π_h ,使用红外反射半透明膜时,进入作物人工实验室的太阳辐射能为:

$$[0036] \quad Q_{1,\pi_p} = [\varphi_{VL}(1 - \pi_{b,p})G_b \cos \theta + \varphi_{IR}(1 - \pi_{b,h})G_b \cos \theta + \varphi_{VL}G_d(1 - \pi_p F_{21}) + \varphi_{IR}G_d(1 - \pi_h F_{21})] \tau A_0 \quad (6)$$

[0037] 式(6)按可见光部和红外辐射整理,得:

$$[0038] \quad Q_{1,\pi_p} = \varphi_{VL}[G_b \cos \theta (1 - \pi_{b,p}) + G_d(1 - \pi_p F_{21})] \tau A_0 + \varphi_{IR}[G_b \cos \theta (1 - \pi_{b,h}) + G_d(1 - \pi_h F_{21})] \tau A_0 \quad (7)$$

[0039] 当正午 $\theta = 0$ 时, $\cos \theta = 1$,记 $\pi_{b,p} = \pi_p$, $\pi_{b,h} = \pi_h$,所以式(7)化作(7a)或(7b):

$$[0040] \quad Q_{1,\pi_p,\theta=0} = [\varphi_{VL}(1 - \pi_p)G_b + \varphi_{IR}(1 - \pi_h)G_b + \varphi_{VL}G_d(1 - \pi_p F_{21}) + \varphi_{IR}G_d(1 - \pi_h F_{21})] \tau A_0 \quad (7a) \text{ 或}$$

$$[0041] \quad Q_{1,\pi_p,\theta=0} = [G_{out} - (\varphi_{VL}\pi_p + \varphi_{IR}\pi_h)(G_b + G_d F_{21})] \tau A_0 \quad (\theta = 0) \quad (7b);$$

[0042] 其中,可见光的入室能量为:

$$[0043] \quad Q_{1,\pi_p,\theta=0,\varphi_{VL}} = [\varphi_{VL}(1 - \pi_p)G_b + \varphi_{VL}G_d(1 - \pi_p F_{21})] \tau A_0 \quad (\theta = 0) \quad (8)$$

[0044] 太阳红外辐射的入室能量为:

$$[0045] \quad Q_{1,\pi_p,\theta=0,\varphi_{IR}} = [\varphi_{IR}(1 - \pi_h)G_b + \varphi_{IR}G_d(1 - \pi_h F_{21})] \tau A_0 \quad (\theta = 0) \quad (9)$$

[0046] 与无遮光方案相比,入室的太阳能量差值为:

[0047]
$$Q_{1,\theta=0} - Q_{1,\pi_p,\theta=0} = [\varphi_p \pi_p (G_b + G_d F_{21}) + \varphi_h \pi_h (G_b + G_d F_{21})] \tau A_0 \quad (10)$$

[0048] 式(9)中,可见光减少量为:

[0049]
$$\Delta Q_{VL} = \varphi_{VL} \pi_p (G_b + G_d F_{21}) \tau A_0 \quad (11)$$

[0050] 远红外辐射能减少量:

[0051]
$$\Delta Q_{IR} = \varphi_{IR} \pi_h (G_b + G_d F_{21}) \tau A_0 \quad (12)$$

[0052] 与遮光网方案相比,入室的太阳辐射能量差值为:

[0053]
$$Q_{1,\theta=0} - Q_{1,\pi_p,\theta=0} = [\varphi_{VL} (\pi_p - \pi) (G_b + G_d F_{21}) + \varphi_{IR} (\pi_h - \pi) (G_b + G_d F_{21})] \tau A_0 \quad (13)$$

[0054] 遮光网方案的可见光偏少量为:

[0055]
$$\Delta Q_{\pi,VL} = [\varphi_{VL} (\pi_p - \pi) (G_b + G_d F_{21})] \tau A_0 \quad (14)$$

[0056] 扣除绿光份额后,遮光网方案的作物光合作用辐射能偏少量为:

[0057]
$$\Delta Q_{\pi,p} = \varphi_p \Delta Q_{\pi,VL} / \varphi_{VL} \quad (15)$$

[0058] 减少补光灯的电功率为:

[0059]
$$\Delta P_{2,\pi-p} = \Delta Q_{\pi,VL} / \eta_d \quad (16)$$

[0060] 但是远红外辐射能增加量:

[0061]
$$\Delta Q_{\pi,IR} = [\varphi_{IR} (\pi_h - \pi) (G_b + G_d F_{21})] \tau A_0 \quad (17)$$

[0062] 绿光辐射能比遮光网的增多量为:

[0063]
$$\Delta Q_{\pi,\rho} = [\varphi_\rho (\pi_h - \pi) (G_b + G_d F_{21})] \tau A_0 \quad (18)$$

[0064] 按空调机性能系数COP计算,红外反射遮光膜的方案比遮光网的方案节省电功率为:

[0065]
$$\Delta P_{2,\pi-p} = \Delta P_{2,\pi-\rho} - (\Delta Q_{\pi,IR} - \Delta Q_{\pi,\rho}) / \text{COP} \quad (19)$$

[0066] 根据本公开一个实施方式所述的农作物人工气候室的补光方法,农作物床的作物从太阳光吸收的光合作用的能量 Q_{p1} 为:

[0067]
$$Q_{p1} = \varphi_p Q_1 \alpha_p \xi \quad (20)$$

[0068] 其中,记 φ_p 为太阳光中可被植物吸收的光合作用的能量份额, α_p 为植物的对光合作用光谱辐射能的吸收率, ξ 为光合作用从光能变成化学能的效率;

[0069] 在正午,无遮光时:

[0070]
$$Q_{p1,\theta=0} = \varphi_p Q_1 \alpha_p \xi \quad (20a)$$

[0071] 在使用遮光网时:

[0072]
$$Q_{p1,\pi,\theta=0} = \varphi_p Q_{1,\pi,\theta=0} \alpha_p \xi \quad (20b)$$

[0073] 在使用红外反射遮光膜时:

[0074] $Q_{p1,\pi_p,\theta=0} = \frac{\varphi_p}{\varphi_{VL}} Q_{1,\pi_p,\theta=0,\varphi_{VL}} \alpha_p \xi \quad (20c)。$

[0075] 根据本公开一个实施方式所述的农作物人工气候室的补光方法,能量方程的补偿光中的光合作用光谱能量 Q_{p2} 为室外、内的可见光光谱段的能量差,在无遮光时:

[0076] $Q_{p2} = Q_2 \eta_d \alpha_p \xi = \alpha_p \xi \varphi_p (Q_{out,0} - Q_1) = \alpha_p \xi \varphi_p Q_{out,0} (1 - \tau) A_0 \quad (23)$

[0077] 补光灯的功率为:

[0078] $Q_2 = Q_{p2} / \alpha_p \xi \eta_d = \varphi_p (Q_{out,0} - Q_1) / \eta_d \quad (24)$

[0079] 其中, η_d 为补偿光灯的电光转化效率;

[0080] 在无遮光且正午 $\theta=0$ 时的补偿光灯的能量 $Q_{2,\theta=0}$ 、被作物吸收的光合作用能量记作 $Q_{p2,\theta=0}$:

[0081] $Q_{2,\theta=0} = \varphi_p (Q_{out,0} - Q_1) / \eta_d \quad (24a)$

[0082] $Q_{2,\pi,\theta=0} = \varphi_p (Q_{out,0} - Q_{p1,\pi,\theta=0}) / \eta_d \quad (23a)$

[0083] 在采用顶棚遮光网 $\theta=0$ 时, Q_1 采用式(4)的 $Q_{1,\pi}$ 计算, Q_2 记作 $Q_{2,\pi}$, Q_{p2} 记作 $Q_{p2,\pi}$,则:

[0084] $Q_{2,\pi,\theta=0} = \varphi_p (Q_{out,0} - Q_{p1,\pi,\theta=0}) / \eta_d \quad (24b)$

[0085] $Q_{p2,\pi} = (G_{out,\theta,b} \pi_b + G_d \pi F_{21}) \tau A_0 \quad (23b)$

[0086] 在采用红外反射遮光膜时,且正午时的补偿光功率 $Q_{2,\pi_p,\theta=0}$ 和被农作物吸收的能量 $Q_{p2,\pi_p,\theta=0}$:

[0087] $Q_{2,\pi_p,\theta=0} = \left(\varphi_p Q_{out,0} - \frac{\varphi_p}{\varphi_{VL}} Q_{1,\pi_p,\theta=0,\varphi_{VL}} \right) / \eta_d \quad (24c)$

[0088] $Q_{p2,\pi_p,\theta=0} = \eta_d Q_{2,\pi_p,\theta=0} \alpha \xi \quad (23c);$

[0089] 其中, $Q_{out,0}$ 取100。

[0090] 根据本公开一个实施方式所述的农作物人工气候室的补光方法,农作物人工气候室反射的辐射能 Q_p 为:

[0091] $Q_p = \varphi_g Q_{in} \quad (25)$

[0092] 其中, $\varphi_g = 8.05\%$;

[0093] 当无遮光 $\theta=0$ 时的绿光反射量,记作 $Q_{p,\theta=0}$;

[0094] $Q_{p,\theta=0} = \varphi_g Q_{1,\theta=0} = \varphi_g G_{out} (a_t \cos \theta + a_d) \tau A_0 \quad (25a)$

[0095] 当顶层采用遮光网遮光且 $\theta=0$,遮光网的遮光度 $\pi=0.6$ 时的绿光反射量,记作 $Q_{p,\theta=0,\pi=0.6}$;

[0096] $Q_{p,\theta=0,\pi=0.6} = \varphi_g Q_{1,\theta=0,\pi} \quad (25b)$

[0097] 当采用红外反射遮光膜时,可见光遮光度为 $\pi_p=0.1$,红外遮光度为 $\pi_{p,h}$, $\theta=0$ 时的

绿光反射量,记作 $Q_{\rho, \theta=0, \pi=0.1}$,

$$[0098] \quad Q_{\rho, \theta=0, \pi=0.1} = \varphi_g Q_{1, \theta=0} = \varphi_g G_{out} (a_t \cos \theta + a_d) (\tau - 0.1) A_0 \quad (25c);$$

[0099] 其中 a_t 取0.6, a_d 取0.4, $G_{out} = G_b + G_d$ 。

[0100] 根据本公开一个实施方式所述的农作物人工气候室的补光方法,所述能量方程中的 Q_4 为玻璃罩对室内的传热量:

[0101] 在白天:

$$[0102] \quad Q_4 = 0.5 G_{out} (1 - \tau - \rho) A_0 = 0.5 (G_b \cos \theta + G_d) \alpha A_0 \quad (26)$$

[0103] 当正午太阳天顶角 $\theta = 0^\circ$ 时,

$$[0104] \quad Q_4 = 0.5 (G_b + G_d) (1 - \tau) A_0 = 0.5 G_{out} (1 - \tau - \rho) A_0 \quad (26a)$$

[0105] 夜晚没有太阳辐射,则

$$[0106] \quad Q_4 = KA (T_{g1} - T) = KA (T_{out} - T_{g2}) \quad (27)$$

[0107] 式中 K 为玻璃壁对空气的平均传热系数, A 为玻璃房的玻璃壁面积, T_{g1} 、 T_{g2} 分别为室内、外侧玻璃温度, T 、 T_{out} 分别为室内、外空气温度。

[0108] 根据本公开一个实施方式所述的农作物人工气候室的补光方法,农作物人工气候室的热容吸热或放热量 Q_m :

$$[0109] \quad Q_m = M_a c_a dT_a/dt + M_f c_f dT_f/dt + M_s c_s dT_s/dt \quad (28)$$

[0110] 式中的 M_a 、 M_f 、 M_s 分别为农作物人工气候室内的空气、作物床秸秆、作物床的植物根系土壤的质量, $M_a \approx M_f \ll M_s$,所以 $M_s c_s$ 的热容是农作物人工气候室的热沉,其温度变化不敏感,当植物根系土壤温度达到设定值后,温度控制只要保留空气和作物床植株的热容波动项; dT_a/dt 、 dT_f/dt 、 dT_s/dt 分别为室内空气平均气温、作物床秸秆平均温度、作物床的植物根系土壤平均温度的变化速率;

[0111] 当农作物人工气候室的室内空气温度控制要求30分钟内允许波动 1°C ,植株和空气的热容基本相同, Q_m 通过下式获得:

$$[0112] \quad Q_m = (M_{af} c_{af}) dT_a/dt \quad (29)$$

[0113] 其中 $M_{af} c_{af} = M_a c_a + M_f c_f$ 。

[0114] 根据本公开一个实施方式所述的农作物人工气候室的补光方法,空调机循环风送给农作物人工气候室冷量或冷量 $\pm Q_k$:

$$[0115] \quad \pm Q_k = m_a c_a (t_h - t_c) = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_{p1} - Q_{p2} - Q_p \pm Q_m \quad (30)$$

[0116] 其中, m_a 为循环风的质量流量, kg/s ; c_a 为空气比热; t_h 为农作物人工气候室循环空调风进入换热器前的来自农作物人工气候室的回风温度或是回风与新风混合的风温,回风口布置在农作物人工气候室作物床的近地面部位; t_c 为循环空调风在送风口进入农作物人工气候室前的气温,送风口布置在农作物人工气候室上方靠近顶面;

[0117] 当 $t_h > t_c$ 送冷风,当 $t_h < t_c$ 送热风。

附图说明

[0118] 附图示出了本公开的示例性实施方式,并与其说明一起用于解释本公开的原理,其中包括了这些附图以提供对本公开的进一步理解,并且附图包括在本说明书中并构成本说明书的一部分。

[0119] 图1是根据本公开的一个实施方式的农作物人工气候室的补光方法的流程示意

图。

[0120] 图2是根据本公开的一个实施方式的农作物人工气候室的结构示意图。

[0121] 图3是根据本公开的一个实施方式的农作物人工气候室的顶层采用遮光网的结构示意图。

[0122] 图4是根据本公开的一个实施方式的排列整齐的平行矩形的视角系数。

[0123] 图中附图标记具体为：

[0124] 1 底层

[0125] 2 四周围壁

[0126] 3 顶层

[0127] 4 遮光网

[0128] 5 补偿光灯

[0129] 6 风机

[0130] 7 滚筒

[0131] 8 换热器

具体实施方式

[0132] 下面结合附图和实施方式对本公开作进一步的详细说明。可以理解的是,此处所描述的具体实施方式仅用于解释相关内容,而非对本公开的限定。另外还需要说明的是,为了便于描述,附图中仅示出了与本公开相关的部分。

[0133] 需要说明的是,在不冲突的情况下,本公开中的实施方式及实施方式中的特征可以相互组合。下面将参考附图并结合实施方式来详细说明本公开的技术方案。

[0134] 除非另有说明,否则示出的示例性实施方式/实施例将被理解为提供可以在实践中实施本公开的技术构思的一些方式的各种细节的示例性特征。因此,除非另有说明,否则在不脱离本公开的技术构思的情况下,各种实施方式/实施例的特征可以另外地组合、分离、互换和/或重新布置。

[0135] 在附图中使用交叉影线和/或阴影通常用于使相邻部件之间的边界变得清晰。如此,除非说明,否则交叉影线或阴影的存在与否均不传达或表示对部件的具体材料、材料性质、尺寸、比例、示出的部件之间的共性和/或部件的任何其它特性、属性、性质等的任何偏好或者要求。此外,在附图中,为了清楚和/或描述性的目的,可以夸大部件的尺寸和相对尺寸。当可以不同地实施示例性实施例时,可以以不同于所描述的顺序来执行具体的工艺顺序。例如,可以基本同时执行或者以与所描述的顺序相反的顺序执行两个连续描述的工艺。此外,同样的附图标记表示同样的部件。

[0136] 当一个部件被称作“在”另一部件“上”或“之上”、“连接到”或“结合到”另一部件时,该部件可以直接在所述另一部件上、直接连接到或直接结合到所述另一部件,或者可以存在中间部件。然而,当部件被称作“直接在”另一部件“上”、“直接连接到”或“直接结合到”另一部件时,不存在中间部件。为此,术语“连接”可以指物理连接、电气连接等,并且具有或不具有中间部件。

[0137] 为了描述性目的,本公开可使用诸如“在……之下”、“在……下方”、“在……下”、“下”、“在……上方”、“上”、“在……之上”、“较高的”和“侧(例如,如在

“侧壁”中)”等的空间相对术语,从而来描述如附图中示出的一个部件与另一(其它)部件的关系。除了附图中描绘的方位之外,空间相对术语还意图包含设备在使用、操作和/或制造中的不同方位。例如,如果附图中的设备被翻转,则被描述为“在”其它部件或特征“下方”或“之下”的部件将随后被定位为“在”所述其它部件或特征“上方”。因此,示例性术语“在.....下方”可以包含“上方”和“下方”两种方位。此外,设备可被另外定位(例如,旋转90度或者在其它方位处),如此,相应地解释这里使用的空间相对描述语。

[0138] 这里使用的术语是为了描述具体实施例的目的,而不意图是限制性的。如这里所使用的,除非上下文另外清楚地指出,否则单数形式“一个(种、者)”和“所述(该)”也意图包括复数形式。此外,当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”以及它们的变型时,说明存在所陈述的特征、整体、步骤、操作、部件、组件和/或它们的组,但不排除存在或附加一个或多个其它特征、整体、步骤、操作、部件、组件和/或它们的组。还要注意的,如这里使用的,术语“基本上”、“大约”和其它类似的术语被用作近似术语而不用作程度术语,如此,它们被用来解释本领域普通技术人员将认识到的测量值、计算值和/或提供的值的固有偏差。

[0139] 图1是根据本公开的一个实施方式的农作物人工气候室的补光方法的流程示意图。

[0140] 如图1所示的农作物人工气候室的补光方法,其包括:

[0141] 建立农作物人工气候室的能量方程,

[0142] 根据所述能量方程,调节照射入农作物人工气候室的光照,使得农作物人工气候室内部的农作物床的受照光合作用光谱能量与室外的农作物床的受照光合作用光谱能量相同,并使得所述农作物人工气候室内部处于预设温度内;

[0143] 其中,所述的农作物人工气候室的单位时间能量方程为:

$$[0144] \quad Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_{p1} - Q_{p2} - Q_p \mp Q_k \pm Q_m = 0 \quad (1)$$

[0145] 所述能量方程中,正号为能量输入,负号为能量消耗,单位均为W; Q_1 为输入到农作物人工气候室内的太阳能,包括直射和散射太阳光能; Q_2 为补偿光灯消耗的电能量; Q_3 为农作物人工气候室内气流均匀化的附加风机消耗的电能量; Q_4 为玻璃罩对室内的传热量; Q_{p1} 、 Q_{p2} 为农作物床吸收的太阳光和补偿光中的光合作用能量,这部分能量将转化为葡萄糖或淀粉或植物纤维的碳氢氧有机物; Q_p 是作物床反射到室外的辐射能量,主要为绿光的能量, $Q_p = \varphi_g Q_1$; $\pm Q_k$ 为空调机循环风送给农作物人工气候室冷量或冷量,当输入热量时为正号,输入冷量时为负号; $\pm Q_m$ 为农作物人工气候室内的室内空气热容、作物床植株热容和根系土壤的热容吸热或放热量,吸热为负号,放热为正号。

[0146] 当农作物人工气候室达到平衡态时,主要是农作物人工气候室的空气热容的温度波动需要的热量。

[0147] 图2是根据本公开的一个实施方式的农作物人工气候室的结构示意图。

[0148] 本公开的农作物人工气候室,模型为长方形的玻璃房,东西向宽 6 ± 0.1 m、南北向深 4 ± 0.1 m,高3m,底层1为农作物床,四周墙壁2和顶层3是双层中空玻璃隔层,玻璃斜坡顶层北高南低;配备有制冷供热系统和风循环系统,室内空气循环经过换热器8获得冷量或热量,换热器8是制冷工质做制冷循环时制冷机的蒸发器,或制冷工质做热泵循环时凝结器;

循环风道在回风口处增设有新风口,在回风口对面玻璃壁开有排风口,新风口和排风口管道里都配有闸片调节阀;玻璃房顶层上方配置有透光率 π 为60%的遮阳网4;遮阳网不用时由滚筒7收卷起来;室内配有LED补偿光灯5,以及测量人工气候室内的温度、湿度、室外温度、风循环回路送、回风温度的测头,室内、外太阳全辐照强度仪和信号收集处理控制系统;人工气候室内中部配有气流均匀化的风机6。

[0149] 本公开中,通过对光谱能量的品质特性分析,确定农作物光合作用和补偿光的光谱为可见光中除绿光外的辐射能,以蓝紫光(380-420nm)和蓝光(420-450nm)为主,红光(605-670nm)为辅;太阳辐射可见光(380-780nm)占太阳光辐射能的份额为47.29%,扣除绿光(500-560nm)所占的 $\varphi_g = 8.05\%$,能被植物吸收的光合作用的能量份额为 $\varphi_p = 39.24\%$ 。

[0150] 在所述能量方程中,调节农作物人工气候室温度所消耗的电功率:

$$P=Q_2+Q_3+Q_k/\text{COP} \quad (2)$$

[0152] 其中,COP为制冷/供热和风循环能量调节系统的性能系数;

[0153] 农作物人工气候室内的室内空气温度、湿度由空调机循环风系统调控送入室内的进风温度、湿度完成,循环风回路在进风口前配置有换热器,调节进风温度;循环风回路的回风配置有新风调节口。

[0154] 太阳辐射穿透玻璃壁和玻璃顶进入农作物人工气候室前有一部分辐射能 $G_{\text{out},\rho}$ 被玻璃反射,有部分 $G_{\text{out},\alpha}$ 被玻璃吸收,余下的进入农作物人工气候室(玻璃试验房)内,这部分能量记作 Q_1 。

[0155] 当所述农作物人工气候室在未被遮挡时:

$$Q_1=G_{\text{in},\theta}A_0=G_{\text{out},\theta}\tau A_0=(G_b\cos\theta+G_d)\tau A_0 \quad (3)$$

[0157] 其中, $G_{\text{in},\theta}$ 和 $G_{\text{out},\theta}$ 分别为农作物人工气候室内部和外部的水平面受到太阳辐照强度,单位为 W/m^2 ,用放置在室内、外水平面上的太阳总辐照仪测量值,下角标in表示室内,out表示室外, θ 表示太阳光线的天顶角; τ 为玻璃的平均透光率,玻璃的透光率 τ 与反射率 ρ 和吸收率 α 的三者关系为 $\tau+\rho+\alpha=1$,一般 $\tau=0.85$, $\rho=0.1$, $\alpha=0.05$; A_0 为农作物人工气候室的农作物床的面积,单位为 m^2 ,本公开中为 $4\times 25\text{m}^2=100\text{m}^2$; G_b 为直射太阳辐射强度,用直射太阳辐射计测得; G_d 为散射太阳辐射强度,为用太阳全辐射计测量值减去直射太阳辐射计测量值的差值;直射太阳辐射强度照射在水平面的作物床的辐射能量用 $G_b\cos\theta$ 计算,其中 θ 为太阳入射线与水平面法线的夹角,称天顶角;对于水平面来说,散射辐射来自天空半球向的照射;直射太阳辐射强度与散射太阳的辐射强度的比例份额,与天空的云层灰度有关,可以从太阳能利用等专门资料中查取,或用测量法获得;作为算例分析,取 $G_b/G_d=6/4$, $G_b=0.6G_{\text{out}}$, $G_d=0.4G_{\text{out}}$, $G_{\text{out}}=1.0\text{kW}$; $\theta=0$ 为正午,正午的正射太阳总辐照强度,可以用 $G_{\text{out},\theta=0}=G_{\text{out}}$ 表示;当正午 $\theta=0$ 时,水平面受到的太阳辐照强度 $G_{\text{out},0}=G_{\text{out}}=1.0\text{W}/\text{m}^2$ 。太阳辐照强度,在大气层外为 $G_0=1368\text{W}/\text{m}^2$ 称太阳辐射常数,实际的太阳辐照强度与太阳光穿过大气层的厚度,大气中含的水汽、二氧化碳浓度有关,本公开中通过安装在室内作物床上方和室外玻璃房顶水平架上的太阳全辐照强度仪测量室内作物床上和室外的太阳辐照强度 $G_{\text{in},\theta}$ 和 $G_{\text{out},\theta}$ 。

$$[0158] \quad Q_{1,\theta=0}=G_{\text{in},0}A_0=G_{\text{out}}(a_t\cos\theta+a_d)\tau A_0=1\times(0.6+0.4)\times 0.85\times 100=85\text{kW};$$

[0159] $Q_{1,\theta=30^\circ} = G_{out} (a_t \cos 75^\circ + a_d) \tau A_0 = 1 \times (0.6 \cos 30^\circ + 0.4) \times 0.85 \times 100 = 78.2 \text{ kW};$

[0160] $Q_{1,\theta=75^\circ} = G_{out} (a_t \cos 75^\circ + a_d) \tau A_0 = 1 \times (0.6 \cos 75^\circ + 0.4) \times 0.85 \times 100 = 49.5 \text{ kW};$

[0161] 也就是说,在正午时,农作物床收到的太阳辐射能最大。

[0162] 当农作物人工气候室通过顶棚遮光网进行遮光时, Q_1 记为 $Q_{1,\pi}$, (在下角标中添加 π 表示) 农作物床上的受照太阳辐射能包括直射辐射能和散射辐射能两部分,计算式为:

[0163] $Q_{1,\pi} = [G_{out,\theta,b} (1 - \pi_b) + G_d (1 - \pi F_{21})] \tau A_0 \quad (4)$

[0164] 其中, $G_{out,\theta,b}$ 为在无遮光时太阳入射角为 θ 的直射辐射能, π_b 为遮光网减少的直射辐射能份额,为作物床被遮光网遮挡的面积份额与遮光度的乘积,具体参数要根据遮光网的几何位置和尺寸计算;举例:遮光网的顶棚与作物床平行高度为 Z ,作物床宽度为 x_b ,遮光网宽度为 x_z ,参考图3,从遮光网顶棚左端射到作物床的右端光线 L_a 的天顶角为 θ_a ,从遮光网顶棚左端射到作物床的左端光线 L_b 的天顶角为 θ_b ,当 $\theta < \theta_a$ 时遮光网对直射太阳的拦截有减太阳直射辐射作用,当 $\theta \geq \theta_a$ 时太阳直射辐射不受遮光网影响,因为太阳高度低;当 $\theta < \theta_a$ 以后,随 θ 的继续减小,太阳高度增高,在作物床上出现遮光网的阴影面积,天顶角为 θ 的光线 L_a 在作物床上产生的阴影宽度 x_π 表示,

[0165] $x_\pi = Z \tan \theta_a - Z \tan \theta = x_a - x_\theta;$

[0166] $x_a = Z \tan \theta_a, x_\theta = Z \tan \theta, x_b = Z \tan \theta_b;$

[0167] $G_{out,\theta,b} (1 - \pi_b) = G_{out,b} \quad (\theta \geq \theta_a) \quad \pi_b = 0 \quad (5a)$

[0168] $G_{out,\theta,b} (1 - \pi_b) = G_{out,b} \left[1 - \left(\frac{x_a - x_\theta}{x_b} \right) \pi \right] \quad (\theta_b \leq \theta \leq \theta_a) \quad \pi_b = \left(\frac{x_a - x_\theta}{x_b} \right) \pi \quad (5b)$

[0169] $G_{out,\theta,b} (1 - \pi_b) = G_{out,b} (1 - \pi) \quad (\theta_b > \theta, \theta = 0) \quad \pi_b = \pi \quad (5c)$

[0170] 散射辐射能 $G_d (1 - \pi F_{21})$ 的 πF_{21} 为遮光网在半球空间辐射中占有的份额, F_{21} 视角系数为作物床平面所拦截的从遮光网顶棚面来辐射份额;

[0171] 所以,根据太阳高度不同,天顶角 θ 不同,选择式(5a)或(5b)或(5c)代入式(4),可计算有遮光时进入农作物人工气候室的太阳辐射能 $Q_{1,\pi}$;

[0172] $\theta_a = \tan^{-1} \frac{x_a}{Z} = \tan^{-1} \frac{13}{3.5} = 74.9^\circ;$

[0173] 当 $\theta = 0$ 时,

[0174] $Q_{1,\pi,\theta=0} = [G_b (1 - \pi) + G_d (1 - \pi F_{21})] \tau A_0 \quad (4a)$

[0175] 作物床的面积为 $x = x_b = 12.5 \text{ m}, y = 8 \text{ m}, Z = 3.5 \text{ m}, x_z = 13.5 \text{ m}, x_a = 13 \text{ m}$,根据 $x/Z = 3.57, y/Z = 2.29$ 由图2得 $F_{12} = 0.52$,令 $\pi = 0.6$,采用遮光措施后,当正午时 $\theta = 0$ 时,单位时间输入到玻璃实验房内的太阳的能量输入到玻璃实验房内的太阳的能量为

[0176] $Q_{1,\theta=0,\pi} = G_{in} A_0 = [0.6 (1 - 0.6) + 0.4 (1 - 0.6 \times 0.52)] \times 0.85 \times 100 = 43.8 \text{ kW};$

[0177] $\theta = 30^\circ$ 时,

[0178] $Q_{1,\theta=30^\circ,\pi} = G_{in} A_0 = \left[G_{out,b} \left[1 - \left(\frac{x_a - x_\theta}{x_b} \right) \pi \right] + G_d (1 - \pi F_{21}) \right] \tau A_0$
 $= \left[0.6 \times \left(1 - \frac{13 - 2.02}{12.5} \times 0.6 \right) + 0.4 (1 - 0.6 \times 0.52) \right] \times 0.85 \times 100 = 47.47 \text{ kW};$

[0179] $\theta = 75^\circ$ 时, $Q_{1,\theta=75^\circ} = 84.7\text{kW}$, 无需遮拦。

[0180] 当采用红外反射半透明膜时的 Q_1 计算, 记作 Q_{1,π_p} 。

[0181] 当采用铺设于农作物人工气候室顶层玻璃上面的红外反射半透明膜时, 可见光的遮光度为 $\pi_p = 0.1$, 占太阳辐射的份额 $\varphi_{VL} = 0.4729$, 红外辐射反射膜的对波长 $\lambda \geq 780\text{nm}$ 的光谱辐射遮光度为 $\pi_h = 0.9$, 占太阳辐射的份额 $\varphi_{IR} = 0.5271$ 东西南北四围玻璃无遮拦; 采用红外反射半透明膜时, 式 (4) 的太阳直射辐射能和散射辐射能, 应当分解为可见光和红外辐射两部分能量, 并分别使用不同的遮光率 π_p 和 π_h , 则式 (4) 转化为使用红外反射半透明膜时进入作物人工实验室的太阳辐射能为:

$$[0182] \quad Q_{1,\pi_p} = [\varphi_{VL}(1 - \pi_{b,p})G_b \cos \theta + \varphi_{IR}(1 - \pi_{b,h})G_b \cos \theta + \varphi_{VL}G_d(1 - \pi_p F_{21}) + \varphi_{IR}G_d(1 - \pi_h F_{21})]\tau A_0 \quad (6)$$

[0183] 整理为可见光和红外辐射两部分表示, 则计算式为

$$Q_{1,\pi_p} = \varphi_{VL}[G_b \cos \theta (1 - \pi_{b,p}) + G_d(1 - \pi_p F_{21})]\tau A_0 + \varphi_{IR}[G_b \cos \theta (1 - \pi_{b,h}) + G_d(1 - \pi_h F_{21})]\tau A_0 \quad (7)$$

[0184] 式 (7) 的等号右边的第一项为可见光部, 第二项为红外辐射部;

[0185] 正午 $\theta = 0$ 时, $\pi_{b,p} = \pi_p$, $\pi_{b,h} = \pi_h$ 所以式 (7) 化作 (7a) 或 (7b)

$$[0186] \quad Q_{1,\pi_p,\theta=0} = [\varphi_{VL}(1 - \pi_p)G_b + \varphi_{IR}(1 - \pi_h)G_b + \varphi_{VL}G_d(1 - \pi_p F_{21}) + \varphi_{IR}G_d(1 - \pi_h F_{21})]\tau A_0 \quad (\theta = 0) \quad (7a)$$

$$Q_{1,\pi_p,\theta=0} = [G_{out} - (\varphi_{VL}\pi_p + \varphi_{IR}\pi_h)(G_b + G_d F_{21})]\tau A_0 \quad (\theta = 0) \quad (7b)$$

$$[0187] \quad = [1 - (0.4729 \times 0.1 + 0.5271 \times 0.9)(0.6 + 0.4 \times 0.52)] \times 0.85 \times 100 = 49.2 \text{ KW};$$

[0188] 其中, 可见光的入室能量为

$$[0189] \quad Q_{1,\pi_p,\theta=0,\varphi_p} = [\varphi_{VL}(1 - \pi_p)G_b + \varphi_{VL}G_d(1 - \pi_p F_{21})]\tau A_0 \quad (\theta = 0) \quad (8)$$

$$[0190] \quad Q_{1,\pi_p,\theta=0,\varphi_p} = [0.4729(1 - 0.1) \times 0.6 + 0.4729 \times 0.4(1 - 0.1 \times 0.52)] \times 0.85 \times 100 = 36.95 \text{ kW};$$

[0191] 太阳红外辐射的入室能量为

$$[0192] \quad Q_{1,\pi_p,\theta=0,\varphi_{IR}} = [\varphi_{IR}(1 - \pi_h)G_b + \varphi_{IR}G_d(1 - \pi_h F_{21})]\tau A_0 \quad (\theta = 0) \quad (9)$$

$$[0193] \quad Q_{1,\pi_p,\theta=0,\varphi_p} = [0.5271(1 - 0.9) \times 0.6 + 0.5271 \times 0.4(1 - 0.9 \times 0.52)] \times 0.85 \times 100 = 12.22 \text{ kW};$$

[0194] 与无遮光方案相比, 节省空调冷量为

[0195] $Q_{1,\theta=0} - Q_{1,\pi_p,\theta=0} = [\varphi_{VL}\pi_p(G_b + G_dF_{21}) + \varphi_{IR}\pi_h(G_b + G_dF_{21})]\tau A_0$
 (10)

[0196] $= [0.4729 \times 0.1 \times (0.6 + 0.4 \times 0.52) + 0.5271 \times 0.9 \times (0.6 + 0.4 \times 0.52)] \times 0.85 \times 100 = 35.83 \text{ kW};$

[0197] 其中可见光减少量只有

[0198] $\Delta Q_{VL} = \varphi_{VL}\pi_p(G_b + G_dF_{21})\tau A_0 = 3.25 \text{ kW}$ (11)

[0199] 主要是远红外辐射能的减少,即

[0200] $\Delta Q_{IR} = \varphi_{IR}\pi_h(G_b + G_dF_{21})\tau A_0 = 32.58 \text{ kW}$ (12)

[0201] 红外反射遮光膜与遮光网方案相比,传入室内的太阳能辐射量差值为:

[0202] $Q_{1,\theta=0} - Q_{1,\pi_p,\theta=0} = [\varphi_{VL}(\pi_p - \pi)(G_b + G_dF_{21}) + \varphi_{IR}(\pi_h - \pi)(G_b + G_dF_{21})]\tau A_0$ (13)

[0203] 式(13)中,遮光网方案的可见光偏少量为:

[0204] $\Delta Q_{\pi,VL} = [\varphi_{VL}(\pi_p - \pi)(G_b + G_dF_{21})]\tau A_0 = [0.4729 \times (0.1 - 0.6)(0.6 + 0.4 \times 0.52)] \times 0.85 \times 100 = -16.24 \text{ kW}$ (14)

[0205] 扣除绿光份额后,遮光网方案的作物光合作用辐射能偏少量为:

[0206] $\Delta Q_{\pi,p} = \varphi_p \Delta Q_{\pi,VL} / \varphi_{VL}$ (15)

[0207] 由此,相比于遮光网方案,采用红外反射遮光膜的方案:

[0208] 减少补偿光的功率:

[0209] $\Delta Q_{\pi,VL} = 0.3924 \times 16.24 / 0.4729 = 13.47 \text{ kW}$ (15a)

[0210] 减少补光灯的电功率为:

[0211] $\Delta P_{2,\pi-p} = \Delta Q_{\pi,VL} / \eta_d = 13.47 / 0.85 = 15.8 \text{ kW}$ (16)

[0212] 增加远红外辐射能:

[0213] $\Delta Q_{\pi,IR} = [\varphi_{IR}(\pi_h - \pi)(G_b + G_dF_{21})]\tau A_0 = [0.5271 \times (0.9 - 0.6)(0.6 + 0.4 \times 0.52)] \times 0.85 \times 100 = 10.86 \text{ kW}$ (17)

[0214] 绿光辐射能比遮光网的增多:

[0215] $\Delta Q_{\pi,\rho} = [\varphi_\rho(\pi_h - \pi)(G_b + G_dF_{21})]\tau A_0 = [0.0805 \times (0.9 - 0.6)(0.6 + 0.4 \times 0.52)] \times 0.85 \times 100 = 1.66 \text{ kW}$ (18)

[0216] 按空调机性能系数COP=3.2计算,红外反射遮光膜的方案比遮光网的方案节省电功率为:

[0217] $\Delta P_{2,\pi-p} = \Delta P_{2,\pi-p} - (\Delta Q_{\pi,IR} - \Delta Q_{\pi,\rho}) / \text{COP} = 15.8 - (10.86 - 1.66) / 3.2 = 12.9 \text{ kW}$ (19)

[0218] Q_{p1} 是作物床的作物吸收从太阳光的能量,记 α_p 为植物的光合作用光谱辐射能吸收率,则作物床吸收的光合作用能量为

$$[0219] \quad Q_{p1} = \varphi_p Q_1 \alpha_p \xi \quad (20)$$

[0220] 其中, φ_p 为太阳光中被植物吸收的光合作用的能量份额, $\varphi_p = 0.3924$, α_p 为植物的光合作用光谱辐射能吸收率, ξ 为光合作用从光能变成化学能的效率; 由于植物的光合作用是光量子作用, 是辐射能中的可做功的有效能起作用, 光量子有效能占有率 ξ 与波长的关系为

$$[0221] \quad \xi = 1 - \frac{T_0}{T_\lambda} = 1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 - \frac{T_0 \lambda}{c_3} \quad (21)$$

[0222] 式中, c_3 是光谱特征温度方程常数, $c_3 = \lambda T_\lambda = 5.33016 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$; 当取环境温度 $T_0 = 298 \text{ K}$, 计算得到, 蓝紫光的 $\xi = 0.9787$, 蓝光的 $\xi = 0.976 - 0.9748$, 红光的 $\xi = 0.964 - 0.9625$; 对植物来说, 蓝紫光、蓝光和红光能被植物的叶绿素接收, 而且其光量子能量中包含的可做功能, 能保证在室温下光合作用的内核联合体产生葡萄糖的能量转化效率到 0.93-0.92 之间; 式 (8) 计算的是理想光合作用效率, 即最高效率; 实际的光合作用效率也很高, 蓝光光合作用效率超过 90%, 红光的光合作用效率达 75-85%; 植物的光合作用光谱辐射能吸收率 α_p 与作物生长的状况, 植株的大小, 绿叶受光面积等因素有关, 大面积实验有报告作物光合作用的效率约 0.3-0.4; 作物光谱能量吸收率应该做更多实验研究统计归纳, 本实施例建议取 $\alpha_p \xi = 0.35$;

[0223] 在正午, 无遮光时的 Q_{p1} , 记作 $Q_{p1, \theta=0}$

$$[0224] \quad Q_{p1, \theta=0} = \varphi_p Q_1 \alpha_p \xi = 0.3924 \times 85 \times 0.35 = 11.7 \text{ kW} \quad (20a)$$

[0225] 在使用遮光网时:

$$[0226] \quad Q_{p1, \pi, \theta=0} = \varphi_p Q_{1, \pi, \theta=0} \alpha_p \xi = 0.3924 \times 43.79 \times 0.35 = 6.01 \text{ kW} \quad (20b)$$

[0227] 在使用红外反射遮光膜时,

$$[0228] \quad Q_{p1, \pi, \theta=0} = \frac{\varphi_p}{\varphi_{VL}} Q_{1, \pi, \theta=0, \varphi_{VL}} \alpha_p \xi = \frac{0.3924}{0.4729} \times 36.95 \times 0.35 = 10.7 \text{ kW} \quad (20c)$$

[0229] 所述的作物床的受照光合作用光谱能量不减原则, 设计匹配的补偿光和对补偿光调控的原则, 具体化为补偿光是由 LRD 灯发射蓝光 (包括蓝紫光)、红光; 根据太阳光中的蓝光 (包括蓝紫光)、红光所占的辐射能份额, 蓝紫光 $\varphi_{bv} = 4.2\%$ 、蓝光的 $\varphi_b = 3.92\%$ 、阳红光的 $\varphi_r = 8.055\%$, 蓝紫光+蓝光与红光的占比为 8.12/8.055; 所以, 补偿光的蓝光 (包括蓝紫光) 的功率与红光的功率配比为

$$[0230] \quad \frac{P_b}{P_r} = 1 \quad (18)$$

[0231] 补偿光量 Q_{p2} , 被植物吸收的补偿光量 $Q_{p2, a}$, 补光灯功率 Q_2 的计算:

[0232] 能量方程 (1) 的补偿光灯所产生的光合作用光谱能量 Q_2 为室外、内的可见光光谱段的能量差:

$$[0233] \quad Q_{p2} = Q_2 \eta_d \alpha_p \xi = \alpha_p \xi \varphi_p (Q_{out, 0} - Q_1) = \alpha_p \xi \varphi_p Q_{out, 0} (1 - \tau) A_0 \quad (23)$$

[0234] $Q_2 = Q_{p2}/\alpha_p \xi \eta_d = \varphi_p(Q_{out,0} - Q_1)/\eta_d \quad (24)$

[0235] η_d 是补偿光灯的电光转化率,本算例 $\eta_d=0.80$;

[0236] 无遮光且正午时的补偿光功率量 $Q_{2,\theta=0}$ 、被吸收的 $Q_{p2,\theta=0}$ 的计算:

[0237] $Q_{2,\theta=0} = \varphi_p(Q_{out,0} - Q_1)/\eta_d = 0.3947(100 - 85)/0.85 = 6.94 \text{ kW}$
(24a)

[0238] $Q_{p2} = \eta_d Q_2 \alpha \xi = 0.85 \times 6.94 \times 0.35 = 2.07 \quad (23a)$

[0239] 遮光网遮光且正午时的补偿光功率 $Q_{2,\pi,\theta=0}$ 、被吸收的 $Q_{p2,\pi,\theta=0}$ 的计算:

[0240] 当采用遮光网时,且正午时补光灯的功率 $Q_{2,\pi,\theta=0}$ 和被农作物吸收的能量 $Q_{p2,\pi,\theta=0}$ 分别为:

[0241] $Q_{2,\pi,\theta=0} = \varphi_p(Q_{out,0} - Q_{p1,\pi,\theta=0})/\eta_d = 0.3947(100 - 43.79)/0.85 = 26.1 \text{ kW} \quad (24b)$

[0242] $Q_{p2,\pi,\theta=0} = \eta_d Q_{2,\pi,\theta=0} \alpha \xi = 0.85 \times 26.1 \times 0.35 = 7.77 \text{ kW} \quad (23b)$

[0243] 当采用红外反射遮光膜时,且正午时的补偿光功率 $Q_{2,\pi_p,\theta=0}$ 和被农作物吸收的能量 $Q_{p2,\pi_p,\theta=0}$:

[0244] $Q_{2,\pi_p,\theta=0} = \left(\varphi_p Q_{out,0} - \frac{\varphi_p}{\varphi_{VL}} Q_{1,\pi_p,\theta=0,\varphi_{VL}} \right) / \eta_d = \left(0.3924 \times 100 - \frac{0.3924}{0.4729} \times 36.95 \right) / 0.85 = 10.1 \text{ kW} \quad (24c)$

[0245] $Q_{p2,\pi_p,\theta=0} = \eta_d Q_{2,\pi_p,\theta=0} \alpha \xi = 0.85 \times 11.76 \times 0.35 = 3.00 \text{ kW} \quad (23c)$

[0246] Q_p 为农作物人工气候室反射的辐射能,主要被反射的是绿光, $\varphi_g = 8.05\%$

[0247] $Q_p = \varphi_g Q_{in} \quad (25)$

[0248] 当无遮光 $\theta=0$ 时的绿光反射量,记作 $Q_{p,\theta=0}$;

[0249] $Q_{p,\theta=0} = \varphi_g Q_{1,\theta=0} = \varphi_g G_{out}(a_t \cos \theta + a_d) \tau A_0 = 0.0805 \times 1 \times (0.6 + 0.4) \times 0.85 \times 100 = 6.84 \text{ kW} \quad (25a)$

[0250] 当采用遮光网遮光时,且 $\theta=0$,遮光度 $\pi=0.6$ 时的绿光反射量,记作 $Q_{p,\theta=0,\pi=0.6}$;

[0251] $Q_{p,\theta=0,\pi=0.6} = \varphi_g Q_{1,\theta=0,\pi} = 0.0805 \times 49.17 = 3.96 \text{ kW} \quad (25b)$

[0252] 当采用红外反射膜遮光时,可见光遮光度为 $\pi_p=0.1$,红外遮光度为 $\pi_{ph}=0.85$, $\theta=0$ 时的绿光反射量,记作 $Q_{p,\theta=0,\pi=0.1}$,

[0253] $Q_{p,\theta=0,\pi=0.1} = \varphi_g Q_{1,\theta=0} = \varphi_g G_{out}(a_t \cos \theta + a_d)(\tau - 0.1)A_0 = 0.0805 \times 1 \times (0.6 + 0.4) \times (0.85 - 0.1) \times 100 = 6.04 \text{ kW} \quad (25c)$

[0254] Q_4 为玻璃罩对室内的传热量,在白天, Q_4 等于玻璃房的玻璃吸收的太阳辐射能 $Q_{out,\alpha} = Q_{out} \alpha$,减去玻璃对室外的放热量 $Q_{4,out}$,工程计算允许假定 $Q_{4,out} = Q_4$;玻璃罩吸收的太阳辐射能,等于室外太阳辐射能,扣除被玻璃反射掉的太阳辐射能 $Q_{out,\rho} = Q_{out} \rho$ 和进入室

内的太阳辐射能 Q_{in} , $Q_{in}=G_{out}(1-\tau-\rho)A_0$, 于是在白天因为吸收了太阳辐射而产生热量, 传热给农作物人工气候室内的热量根据方程计算式为,

$$[0255] \quad Q_4=0.5G_{out}(1-\tau-\rho)A_0=0.5(G_b\cos\theta+G_d)\alpha A_0 \quad (26)$$

[0256] 当正午 $\theta=0$ 时,

$$[0257] \quad Q_4=0.5 \times (0.6+0.4) \times 0.05 \times 100=2.5\text{kW} \quad (26a)$$

[0258] 当早晨 $\theta=75^\circ$ 时

$$[0259] \quad Q_4=0.5 \times 1000 \times (0.6\cos 75^\circ+0.4) \times 0.05 \times 100=1.39\text{kW} \quad (26b)$$

[0260] 夜晚没有太阳辐射, 则

$$[0261] \quad Q_4=KA(T_{g1}-T)=KA(T_{out}-T_{g2}) \quad (27)$$

[0262] 式中K为玻璃壁对空气的平均传热系数,A为玻璃房的玻璃壁面积, T_{g1} 、 T_{g2} 分别为室内、外侧玻璃温度, T 、 T_{out} 分别为室内、外空气温度。

[0263] Q_m 为农作物人工气候室气温波动的热容吸热项,

$$[0264] \quad Q_m=M_a c_a dT_a/dt+M_f c_f dT_f/dt+M_s c_s dT_s/dt \quad (28)$$

[0265] 式中的 M_a 、 M_f 、 M_s 分别为农作物人工气候室内的空气、作物床秸秆、作物床的植物根系土壤的质量, c_a 、 c_f 、 c_s 分别为农作物人工气候室内的空气、作物床秸秆、作物床的植物根系土壤的比热, $M_a \approx M_f \ll M_s$, 所以 $M_s c_s$ 的热容是农作物人工气候室的热沉, 其温度变化不敏感, 当植物根系土壤温度达到设定值后, 温度控制只要保留空气和作物床植株的热容波动项; 例如, 根系的土壤热容量很大, 以0.4米深度的土壤层, 0.6米高的作物层, 3米高的农作物人工气候室, 土层质量 $M_1=1300\text{kg}/\text{m}^3 \times 0.4\text{m} \times 100\text{m}^2=52000\text{kg}$, 含水土壤比热容 $c_1=3.5\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 土壤的热容为 $M_1 c_1=182000\text{kJ}/\text{K}$;

[0266] 作物层的质量 $M_2=5\text{kg}/\text{m}^3 \times 0.5 \times 100\text{m}^3=250\text{kg}$, 湿作物的比热容 $c_2=2.5\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $M_2 c_2=625\text{kJ}/\text{K}$;

[0267] 空气层的质量 $M_3=1.3\text{kg}/\text{m}^3 \times 3 \times 100\text{m}^3=390\text{kg}$, 空气的比热容 $c_3=1.1\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $M_3 c_3=429\text{kJ}/\text{K}$

[0268] 所以, 空气和作物床的热容仅仅占总热容的0.58%, 而植物根系土壤层的热容占总热容的99.4%。

[0269] 当农作物人工气候室的室内空气温度控制要求30分钟内允许波动 1°C , 植株和空气的热容基本相同, Q_m 用简化式计算

$$[0270] \quad Q_m=(M_{af} c_{af}) dT_a/dt \quad (29)$$

[0271] 其中 $M_{af} c_{af}=M_a c_a+M_f c_f$;

[0272] 如果室内空气温度5分钟波动1度, 则:

$$[0273] \quad Q_m=M_f c_f dT_f/dt=(429+625) \times 1/1800=0.41\text{kW} \quad (29a)$$

[0274] 所以, 当农作物人工气候室进入精密温度调控时, Q_m 可以忽略不计。

[0275] 所述的农作物人工气候室的能量平衡, 是由制冷供热系统和风循环系统完成; 所述的制冷供热系统, 采用压缩式制冷机的蒸发器与循环于农作物人工气候室的循环风进行换热, 向农作物人工气候室的提供冷量, 平衡太阳辐射进入农作物人工气候室的过多热量, 保持室内空气温度在设计温度的许可波动范围; 当夜间, 农作物人工气候室对外散热, 室内气温有下降趋势时, 制冷工质反向循环, 制冷机做热泵运行, 制冷机的蒸发器变为冷凝器, 向循环风提供热量; 记, m_a 为循环风的质量流量, kg/s ; c_a 为空气比热; t_h 为农作物人工气候

室循环空调风回风口的风温,回风口布置在农作物人工气候室作物床的近地面部位; t_c 为循环空调风送风口的冷风(或热风)温度,送风口布置在农作物人工气候室上方靠近顶面;根据能量方程的得出 Q_k 的计算式为:

[0276] 空调机调整农作物人工气候室气温提供的冷量 Q_k 的计算式为:

$$[0277] \quad \pm Q_k = m_a c_a (t_h - t_c) = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_{p1} - Q_{p2} - Q_p \pm Q_m \quad (30)$$

[0278] 其中, m_a 为循环于农作物人工气候室和空调机蒸发器的循环风的质量流量,kg/s; c_a 为空气比热, t_h 为农作物人工气候室循环空调风回风口的风温,回风口布置在农作物人工气候室作物床的近地面部位, t_c 为循环空调风送风口的冷风温度,送风口布置在农作物人工气候室上方靠近顶面;

[0279] 当 $t_h > t_c$ 送冷风,当 $t_h < t_c$ 送热风,当 $t_h = t_c$ 时不送风;

[0280] 无遮光,且正午时,

$$[0281] \quad Q_{k, \theta=0} = 85 + 6.94 + 1 + 2.5 - 11.7 - 2.07 - 6.84 + 0.41 = 75.24 \text{ kW} \quad (30a)$$

[0282] 当使用遮光网遮光,且正午时

$$[0283] \quad Q_{k, \pi, \theta=0} = 43.8 + 26.1 + 1 + 2.5 - 6.01 - 7.77 - 3.96 + 0.41 = 56.07 \text{ kW} \quad (30b)$$

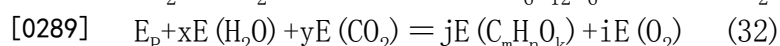
[0284] 当使用红外反射膜遮光,且正午时

$$[0285] \quad Q_{k, \pi p, \theta=0} = 49.2 + 11.76 + 1 + 2.5 - 10.7 - 3.5 - 6.04 + 0.41 = 44.63 \text{ kW} \quad (30c)$$

[0286] 计算结果汇中表

[0287]

	Q_1	Q_{p1}	$Q_{p2, a}$	Q_2	Q_3	Q_p	Q_4	Q_m	Q_k
无遮光	85	-11.7	-2.07	6.94	1.0	-6.84	2.5	0.41	75.24
遮光网	43.8	-6.01	-7.77	26.1	1.0	-3.96	2.5	0.41	56.07
遮光膜	49.2	-10.7	-3.00	10.1	1.0	-6.04	2.5	0.41	43.47



$$[0290] \quad \text{室外日照能量 } Q_{out, D} = Q_{out, 0, day} A_0 = 0.60 \times 3600 \times 8 \times 100 = 1728000 \text{ KJ};$$

$$[0291] \quad \text{日产生葡萄糖克数 } m = \alpha_p \frac{\varphi_p Q_{out, D}}{\Delta H} m_{mol} = 0.30 \times 0.3924 \times$$

$$172800 \div 2870 \times 0.180 \text{ kg} = 12.8 \text{ kg}。$$

[0292] 在本说明书的描述中,参考术语“一个实施例/方式”、“一些实施例/方式”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例/方式或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本申请的至少一个实施例/方式或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不必针对的是相同的实施例/方式或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或多个实施例/方式或示例中以合适的方式结合。此外,在不相互矛盾的情况下,本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例/方式或示例以及不同实施例/方式或示例的特征进行结合和组合。

[0293] 此外,术语“第一”、“第二”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此,限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。在本申请的描述中,“多个”的含义是至少两个,例如两个,三

个等,除非另有明确具体的限定。

[0294] 本领域的技术人员应当理解,上述实施方式仅仅是为了清楚地说明本公开,而并非是对本公开的范围进行限定。对于所属领域的技术人员而言,在上述公开的基础上还可以做出其它变化或变型,并且这些变化或变型仍处于本公开的范围內。

建立农作物人工气候室的能量方程

根据所述能量方程，调节照射入农作物人工气候室的光照，使得农作物人工气候室内部的农作物床的受照光合作用光谱能量与室外的农作物床的受照光合作用光谱能量相同，并使得所述农作物人工气候室内部处于预设温度内

图1

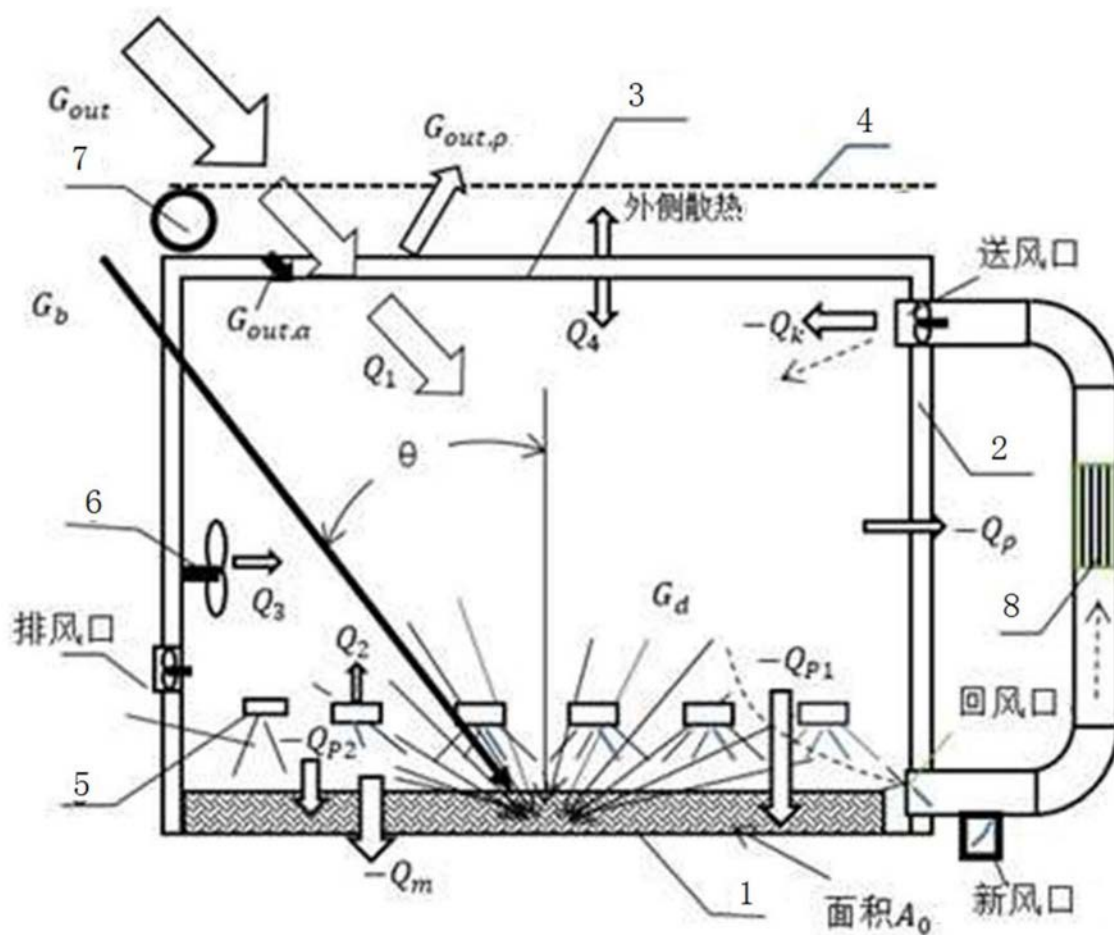


图2

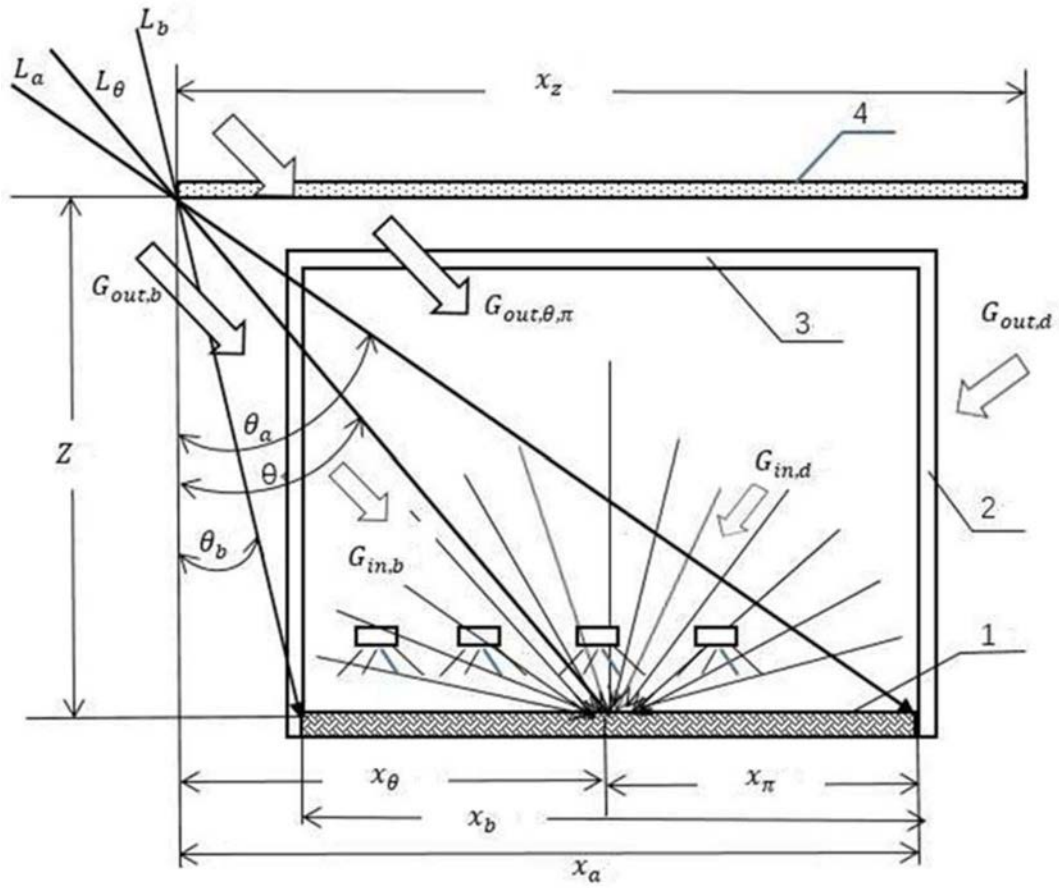


图3

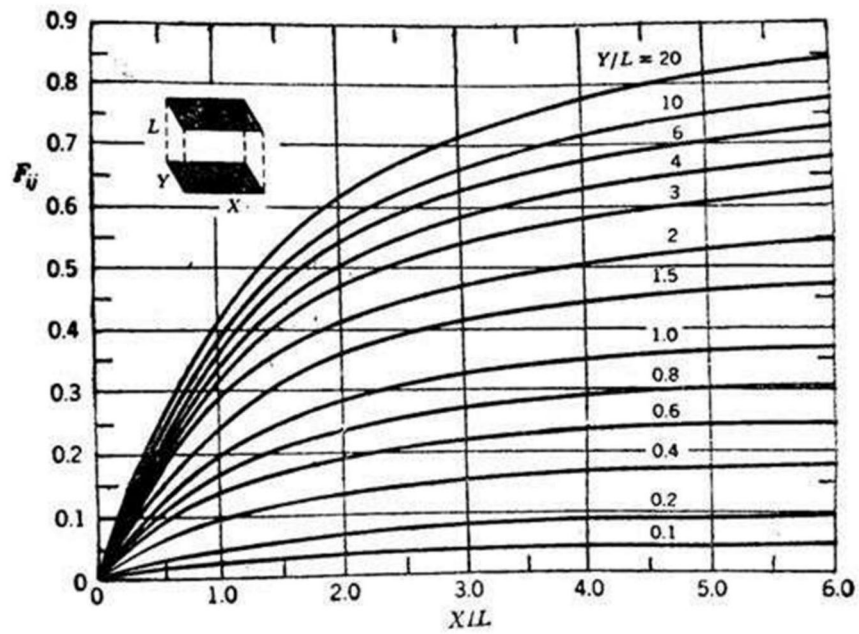


图4