

文章编号: 1671-6612 (2019) 03-328-04

立面绿化植被层能量平衡数学模型研究

何 川 王 亮 王志星

(西南科技大学土木工程与建筑学院 绵阳 621000)

【摘要】 建筑立面绿化具有很强的降温节能潜力。通过分析立面绿化植被层存在的得/散热作用项, 并对每一热作用项的数学表达进行研究, 最终建立适合建筑立面绿化植被层的能量平衡数学模型。

【关键词】 立面绿化; 能量平衡; 数学模型

中图分类号 TU111.4 文献标识码 A

Study on Mathematical Model of Energy Balance of Vegetation and Vegetation Layer

He Chuan Wang Liang Wang Zhixing

(Southwest University of Science and Engineering School of Civil Engineering and Architecture, Mianyang, 621000)

【Abstract】 The greening of building facades has a strong potential for cooling and energy saving. This article analyzes the possible gains/discharges of the vegetation on the facade and studies the mathematical expressions of each heat effect, and finally establishes an energy balance mathematical model that is suitable for the greening of the building facade.

【Keywords】 facade greening; energy balance; mathematical model

0 引言

立面绿化植被层能量平衡过程中, 植被层与外界环境及其自身发生的热质传递行为定义为立面绿化植被层的热作用, 包括反射、对流换热、辐射、蓄热、导热、蒸腾、光合、呼吸等方式, 它们受地域环境、自然气候以及植被种类的影响。本研究以爬山虎立面绿化植被层为对象, 对其能量平衡的数学模型展开研究, 需作如下假设:

(1) 爬山虎为漫射灰体, 植被层无土壤基质及覆盖率为 100%, 植被层贴近墙面, 且根茎远少于叶片, 长波辐射仅发生在植被层与大气之间。

(2) 除爬山虎自身的光合作用、呼吸作用和蒸腾作用外, 其余生理活动产生的热效应均忽略不计。

(3) 植被是成熟健壮的植株, 且各项物性参数一致, 不受植被高度的影响。

(4) 忽略垂直方向上的热质传递, 只考虑绿化墙体水平方向的一维传热。

基于以上假设, 将立面绿化植被层视为一个系统, 室外空气、建筑外围护结构以及各种辐射表面视为环境, 系统与环境的能量交换过程可用图 1 来表达, 根据热力学第一定律, 可得到植被层能量平衡方程:

$$Q_s + Q_l + Q_r + Q_t + Q_p + Q_b + Q_c + Q_d = 0 \quad (1)$$

图 1 和式 (1) 中: Q_s 为植被层吸收太阳辐射热流密度, W/m^2 ; Q_l 为植被层吸收大气长波辐射热流密度, W/m^2 ; Q_r 为植被层热辐射散失的热流密度, W/m^2 ; Q_t 为植被层蒸腾作用消耗的热流密度, W/m^2 ; Q_p 为植被层光合作用转换的热流密度, W/m^2 ; Q_b 为植被层呼吸作用产生的热流密度, W/m^2 ; Q_c 为植被层与环境对流换热热

基金项目: 西南科技大学创新基金项目 16ycx087

作者简介: 何 川 (1997-), 男, 在读本科生, 主要从事建筑生态节能研究, E-mail: 1948574073@qq.com

通讯作者: 王 亮 (1983.12-), 男, 博士, 讲师, 主要从事绿色建筑、生态化建筑节能体系研究。

收稿日期: 2018-06-02

流密度, W/m^2 ; Q_d 为植被层的导热通量, W/m^2 。以上各项, 以植被层得热为正, 散热或蓄热为负。



图 1 绿植围护结构能量收支图

Fig.1 Green plant envelope structure energy budget

1 植被层辐射换热热作用的数学表达

1.1 植被层吸收太阳辐射的热流密度

已有研究资料表明, 植被叶片对波长为 $0.29\sim 0.4\mu m$ 的紫外线的吸收率最高, 可达 97% 左右; 对波长为 $0.4\sim 0.76\mu m$ 的可见光的吸收率因植被种类的不同而存在一定的差异, 取值大致为 85%; 对波长为 $0.7\sim 1.2\mu m$ 的近红外线的吸收基本忽略不计, 多数显示为反射和透射; 对波长大于 $1.2\mu m$ 的远红外线主要被叶片内的水分所吸收, 吸收率一般不超过 15%^[1]。本文将植被层视为一系统, 植被层吸收的太阳辐射热流密度等于植被层太阳辐射的流入量与流出量 (或内层剩余量之差), 可由式 (2) 进行数学表达:

$$Q_s = Q_w - Q_n \quad (2)$$

式中, Q_s 为植被层吸收太阳辐射热流密度, W/m^2 ; Q_w 为入射太阳辐射热流密度, W/m^2 , Q_n 为植被层内层太阳辐射热流密度, W/m^2 , 其中, Q_w 和 Q_n 均由仪器直接测得。由公式 $Q_s = Q_w \cdot \alpha_{s,a}$ 可知, $\alpha_{s,a} = Q_s / Q_w$, 其中 $\alpha_{s,a}$ 为太阳辐射的吸收率。

1.2 植被层吸收大气长波辐射的热流密度

由于太阳辐射波长范围为 $0.29\sim 5.3\mu m$ 之间, 远低于地面和大气的辐射波长 (主要集中在 $4\sim 120\mu m$ 之间), 所以, 通常称太阳辐射为短波辐射, 称地面和大气辐射为长波辐射。植被层所

吸收的长波辐射主要指植被层与大气之间的长波辐射换热, 植被层吸收大气长波辐射的热流密度可由式 (3) 进行数学表达^[2]:

$$Q_l = \alpha_{l,a} \cdot \sigma (t_{air} + 273.5)^4 \cdot (0.802 + 0.004 t_{dew}) \quad (3)$$

式中, Q_l 为植被层吸收大气长波辐射热流密度, W/m^2 ; $\alpha_{l,a}$ 为植被层大气长波辐射吸收率, 一般取经验值 0.98-1; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 值为 $5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$; t_{air} 为环境温度, $^{\circ}C$, 可由仪器直接测得; t_{dew} 为露点温度, $^{\circ}C$, 可通过查焓湿图确定。

1.3 植被层长波辐射散热

对于植被层而言, 向外界辐射的电磁波波长在 $4\sim 120\mu m$ 之间, 故称为植被层的长波辐射散热, 植被层长波热辐射散失的热流密度可由式 (4) 进行数学表达^[3]:

$$Q_r = \sigma \cdot \epsilon_l \cdot (t_c + 273.15)^4 \quad (4)$$

式中, Q_r 为植被层长波热辐射散失的热流密度, W/m^2 ; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 值为 $5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$; ϵ_l 为植被层的发射率, 与植被层的种类和生长特性有关, 一般取值 0.85~0.98; t_c 为植被层平均温度, $^{\circ}C$, 由仪器测得植被层不同厚度的温度后取其平均值。

2 植被层生理作用散热的数学表达

2.1 植被层蒸腾作用的散热

植物的蒸腾作用是指水分从植物体表面 (主要是叶子) 以水蒸汽状态散失到大气中的过程。植物在吸收太阳辐射热量之后, 为了保证植物叶片自身的温度不致过高, 植物会通过自身的蒸腾作用, 将吸收的热量以水蒸气的形式, 散发到外界环境中去, 达到植被层主动散热的效果。需要了解的是, 影响植物蒸腾作用的因素众多, 不仅受外界环境影响 (比如: 光照强度、温度、湿度等), 还受植物自身的生理调节和控制 (比如: 植物的气孔频度、气孔直径、气孔下腔容和气孔开度等)。植被层蒸腾作用消耗的热流密度可由式 (5) 进行数学表达:

$$Q_t = v_t \cdot l \quad (5)$$

式中, Q_t 为植被层蒸腾作用消耗的热流密度, W/m^2 ; v_t 为单位面积植被层蒸腾作用水分耗

散平均速率, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 可由光合仪测得; l 为水分的蒸发潜热, 取常温常压下的值, $2.43\times 10^6\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.2 植被层光合作用的散热

光合作用主要是指绿色植物利用叶绿素等光合色素在可见光的照射下, 将 CO_2 和 H_2O 转化为储存能量的有机物, 并释放出 O_2 的生化过程。反应中各能量转换过程如表 1 所示^[3,5,6]。

表 1 光合作用能量转换

Table 1 Photosynthesis energy conversion

能量转变	储存能量的物质	能量转变过程	进行转换的部位	光、碳反应
光能→	光量子			
光化学反应→	电子	原初反应	基粒类囊体	光反应
活跃的化学能→	ATP、NADPH	电子传递光合磷酸化	基粒类囊体	光反应
稳定的化学能	糖类等	碳同化	叶绿体基质	暗反应

由植物生理学知识可知, 光合作用反应式为:
 $6\text{CO}_2(\text{g}) + 12\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \xrightarrow{h\nu} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O}_2(\text{g}) + 6\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ (6)

在环境温度 25°C 和一个标准大气压下, 该反应的热效应等于其标准摩尔反应焓 $\Delta_r H_m^\theta(25^\circ\text{C})$, 可通过式 (7) 计算:

$$\Delta_r H_m^\theta(25^\circ\text{C}) = \sum n_i \Delta_f H_m^\theta(25^\circ\text{C}) \quad (7)$$

式中, n_i 为反应物和生成物的化学计量数; $\Delta_f H_m^\theta(25^\circ\text{C})$ 为对应反应物或生成物在 25°C 时的标准摩尔生成焓。通过查得各种物质的 $\Delta_f H_m^\theta(25^\circ\text{C})$ 后带入式 (7), 可得计算结果为 $\Delta_r H_m^\theta(25^\circ\text{C}) = 2.8\times 10^6\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

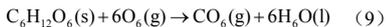
以单位面积单位时间内植物合成葡萄糖的速率 $v_{p, \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 表示光合作用的速率, 则植被层通过光合作用储存的热流密度 Q_p (W/m^2), 可用式 (8) 进行数学表达:

$$Q_p = \Delta_r H_m^\theta(25^\circ\text{C}) \cdot \frac{v_{p, \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}}{M_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}} \quad (8)$$

式中, $M_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}$ 为葡萄糖的摩尔质量, 为 $0.18\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$, $v_{p, \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}$ 为植物合成葡萄糖的总速率, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.3 植被层呼吸作用的产热

呼吸作用主要是指植物在有氧条件下, 将碳水化合物、脂肪、蛋白质等底物氧化, 产生 ATP、 CO_2 和水以供生理活动所需的过程。若将呼吸作用看作是光合作用相逆反的过程, 则呼吸作用的反应式如下:



呼吸作用产生的热量 Q_b 可由下式计算得出:

$$Q_b = -\Delta_r H_m^\theta(25^\circ\text{C}) \cdot \frac{v_{r, \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}}{M_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}} \quad (10)$$

式中, $\Delta_r H_m^\theta(25^\circ\text{C})$ 为 25°C 时的光合作用标准摩尔反应焓, 为 $2.8\times 10^6\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$; $v_{r, \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}$ 为单位面积单位时间植物呼吸作用消耗葡萄糖的速率, 单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; $M_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}$ 为 α -D-葡萄糖的摩尔质量, 约为 $0.18\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$, 负值表示呼吸作用是消耗能量。

批注[A1]: ?

2.4 植被层净光合作用的散热

由式 (8) 和 (10) 可分别计算出植物光合作用储存的能量和呼吸作用消耗的能量, 但由于实验条件的限制, 无法直接测得植物生成葡萄糖的速率和分解葡萄糖的速率, 为了获得准确的数据, 可将将光合作用和呼吸作用产生的效果合并为净光合作用, 进行分析计算, 其净光合作用热效应的数学表达式如下:

$$\begin{aligned} Q_{net} &= Q_p + Q_b \\ &= \Delta_r H_m^\theta(25^\circ\text{C}) \cdot \frac{v_{p, \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} - v_{r, \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}}{M_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}} \\ &= \Delta_r H_m^\theta(25^\circ\text{C}) \cdot \frac{v_{net, \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}}{M_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, Q_{net} 为净光合作用热效; $\Delta_r H_m^\theta(25^\circ\text{C})$ 为 25°C 时的光合作用标准摩尔反应焓, 为 $2.8\times 10^6\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$; $v_{p, \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} - v_{r, \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}$ 为净光合速率, 单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 该值表征的是植物积累干

物质的能力; $M_{C_6H_{12}O_6}$ 为葡萄糖的摩尔质量, 约为 $0.18 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。但是现有光合仪可测得植物的净光合速率所测指标不是干物质的消耗或生成速率, 而是 CO_2 的净变化速率 $v_{\text{net}, \text{CO}_2}$ 。因此, 可将式 (11) 换算为:

$$Q_{\text{net}} = \Delta_r H_m^\theta (25^\circ \text{C}) \cdot \frac{v_{\text{net}, \text{CO}_2}}{6M_{\text{CO}_2}} \quad (12)$$

式中, M_{CO_2} 为 CO_2 的摩尔质量, 约为 $0.044 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$; $v_{\text{net}, \text{CO}_2}$ 为 CO_2 的净变化速率, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 可通过光合仪测得。

3 植被层其它散热方式

3.1 植被层对流换热

植被层对流换热是指在风压、热压等因素的作用下, 植被层与空气之间存在的能量交换现象。其对流换热强弱受到叶面积指数、植物种类、环境因素和气候条件等因素影响, 其值往往是一个动态过程。植被层对流换热采用牛顿冷却计算式:

$$Q_c = h \cdot (t_c - t_{\text{air}}) \quad (13)$$

式中, Q_c 为植被层与环境对流换热热流密度, W/m^2 ; h 为对流换热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, h 根据实验经验公式 $h = 5.7 + 3.8v_c$ 计算得出^[7], 其中 v_c 为植被层平均风速, m/s , 由风速仪测得植被层不同厚度风速后取其平均值; t_c 为植被层平均温度, $^\circ\text{C}$; t_{air} 为环境温度, $^\circ\text{C}$ 。

3.2 通过植被层的导热

将立面绿化植被层视为墙体外表面上的一种材料, 但这种材料和普通多孔材料相比, 具有较大的差别, 这是因为叶片之间的间距并不是封闭的, 而是由流动的空气组成。同时, 由于夏季植物的蒸腾作用, 流动空气的湿度较大, 并不能按空气的导热系数很小来考虑, 应该考虑湿空气的特征, 结合文献^[8]的研究结论, 本文将植被层等效为一种导热系数为 $0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的材料。根据传热学的相关理论分析可知, 通过植被层的导热通量由式 (14) 来表达:

$$Q_d = \lambda \cdot (t_w - t_n) \quad (14)$$

式中, Q_d 为植被层的导热通量, W/m^2 ; t_w 为植被层外表面的温度, $^\circ\text{C}$; t_n 为植被层最里层的温度, $^\circ\text{C}$, 可由通过温湿度记录仪实测得到; λ 为植被层的导热系数取 $0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

4 植被层能量平衡方程

通过对式 (1) 的各项进行积分, 可以得到一天中任意时间段 $\Delta\tau$ 内立面绿化植被层的能量平衡方程, 其数学表达式见 (15):

$$\begin{aligned} & \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} (Q_w - Q_e) d\tau + \alpha_{t,a} \cdot \sigma \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} (t_{\text{air}} + 273.5)^4 \cdot (0.802 + 0.004 t_{\text{dew}}) d\tau \\ & + \sigma \cdot \epsilon \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} (t_c + 273.15)^4 d\tau + \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} v_i d\tau \\ & + \Delta_r H_m^\theta (25^\circ \text{C}) \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \frac{v_{\text{net}, \text{CO}_2}}{6M_{\text{CO}_2}} d\tau + \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} (5.7 + 3.8v) \cdot (t_c - t_{\text{air}}) d\tau \\ & + \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} Q_d d\tau = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

式 (15) 分析了包括光合作用和呼吸作用在内的可能存在主要作用的每一项能量耗散途径。本能量平衡式中包括了 17 个参数, 其中包含 9 个需要连续测量的参数。确定计算时间 τ , 即可计算立面绿化植被层的能量平衡收支情况。

5 结论

本文建立了包括植被层呼吸作用、光合作用在内的 8 项热作用项的能量平衡方程, 能够较为全面的概括植被层的热过程。同时方程 (15) 的推导基于立面绿化植被层普遍满足的几个假设, 因此可以从爬山虎立面绿化植被层推广到其他立面绿化植被层系统, 为绿植建筑的能量平衡理论研究起到有益的补充。

参考文献:

- [1] 杨世杰. 植物生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 孟庆林, 张玉, 张磊. 热气候风洞内测定种植屋面当量热阻[J]. 暖通空调, 2006, 36(10): 111-113.
- [3] J L Monteith, MHU. Principles of Environmental Physics[M]. London: Academic Press, 2008.
- [4] 冯驰. 佛甲草植被屋顶能量平衡研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [5] 潘瑞炽. 植物生理学(第 6 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [6] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [7] 冯雅, 陈启高. 种植屋面热过程的研究[J]. 太阳能报, 1999, (3): 311-315.
- [8] 刘凌. 寒冷地区城镇建筑垂直绿化生态效应研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.