

玉米冠层凝露的观测与模拟*

615-622

陆佩玲

任保华

(北京林业大学森林资源与环境学院 北京 100026) (中国科技大学地球与空间科学系 合肥 230026)

于强

(中国科学院地理研究所禹城试验站 北京 100101)

摘要 对模拟植物冠层温度的能量平衡单层模型进行了某些方法上的改进,并使用实测小气候资料,用数值方法,模拟了玉米冠层顶部的温度,模拟结果与实测的冠层温度相符合。利用冠层温度下的饱和水汽压估算了玉米冠层顶部结露的持续时间和结露量。结果表明,在中纬度低平原地区秋季的晴天,大约下午17:00开始结露,清晨6:00~7:00结束,结露的持续时间约13~14h,露形成的时间进程为开始和结束急剧,中间维持稳定,呈倒“U”字。结露速率在 $0.05 \sim 0.07 \text{ gm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

关键词: 玉米,冠层温度,露,模拟。

THE OBSERVATION AND SIMULATION OF DEW
FORMATION OVER MAIZE CANOPY

Lu Peiling

(College of Resources and Environment of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China)

Ren Baohua

(Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026)

Yu Qiang

(Yucheng Comprehensive Experimental Station, Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080, China)

Abstract A single-layer model to simulate plant canopy temperature in basis on energy budget approach, is improved in this research. The temperature of the upper canopy is estimated from microclimatic data by the numerical method. The temperatures simulated by this model fit the observed values well. The duration of dew formation and the amount of dew are estimated by predicting the time when the temperature of upper leaves falls below the dew point. The results show that dew occurs at about 17:00, and ends at about 6:00 or 7:00 in the morning next day on a fine day in the autumn at the middle and low altitudes in

* 国家自然科学基金“九五”重大资助项目(49890330)。

致谢: 本文得到王天铎先生的指导, 在此表示衷心感谢。

收稿日期: 1996-10-16, 修改稿收到日期: 1997-04-28。

China. The duration of dew formation is about 13~14 hours. The rate of dewfall is stable throughout the main time of dew formation. However, during the first and last 30 minutes of dew formation time, the dewfall changes rather rapidly. The course of dewfall has a shape of a reversed "U". The rate of dewfall is about $0.05 \sim 0.07 \text{ gm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Key words: maize, canopy temperature, dew, simulation.

叶片潮湿是许多植物致病真菌传染过程开始的先决条件,植物表面的露提供给植物的水比雾多,而停留的时间通常比雨长,因而是促进真菌病发生和流行的主要的水的形式。虽然露水在叶片上实际停留的时间可以通过位于植物顶部的叶片湿度传感器获得,但是要预测它则必须能够根据气象数据计算叶温低于露点的时间,用求露的出现与气象条件的相关的办法,但也受地区的局限。普适性强的模型要建立在冠层热量平衡的机理知识之上。

在理论上,估算(或模拟)露的持续时间通常有下面两种方法:(1)统计方法。例如,统计结露与90%的相对湿度之间的相关^[1]或者用统计结露与多种气象因素之间的相关,以一种或多种气象变量来推算露的时间的经验模型^[2]。但由于这些统计模型的资料是在气象条件变化范围有限的地区观测的,其普适性差;在条件与原来求得相关的地区相差较多的地区,90%的相对湿度的出现与叶片表面潮湿的出现并不一致^[1]。(2)计算方法。用能量平衡法的单层模型估算露的持续时间,这种方法应用很广。Pedro 与 Gillespie^[3,4]用这种方法估算了苹果、小麦和大豆作物的露的持续时间,而 Gillespie 与 Barr^[5]将这种方法应用到洋葱, Lhomme 与 Jimanaz^[6]也将类似的方法用于香蕉叶片。结果表明,模拟的露的持续时间与实测值相比误差小于1h, Wittich^[7]总结了前人用不同的简化方案得到的3种能量平衡单层模型,并模拟了苹果冠层顶部暴露于空中的单叶的露的持续时间。

本文利用 Paw U^[7]能量平衡的单层模型描述了玉米冠层特定的边界条件对冠层顶部露的持续时间的的影响,并使用观测的玉米冠层小气候资料,模拟了玉米冠层的温度。在此基础上,用冠层温度下的饱和水汽压和潜热通量,估算了结露的持续时间和结露量。

1 试验方法和小气候观测

大田试验是在中国科学院禹城综合试验站(纬度 $36^{\circ}50'$,经度 $116^{\circ}30'$,海拔22m)进行的。供试材料为玉米。玉米试验地长约60m,宽约40m。观测点离最近边行约15m,玉米处于灌浆期,生长茂盛,高度约2.0m,叶面积指数约7~8。

观测时间是1995年9月8~13日和1996年8月11~21日。观测项目有干湿球温度、冠层叶温、风速等,观测高度为玉米地内距地面50cm、150cm(冠层内)和250cm(冠层上方)。所用仪器分别为中国科学院地理所研制的电动阿斯曼通风干湿表3部,红外辐射测温仪(日本 National 公司产)和热线风速仪(长春产)。干湿球温度的观测数据由数据采集器(Data Taker,澳大利亚产)自动采集,每15s采集一组数据,每5min求一次平均值并储存于数据采集器。红外辐射测温仪安装于一个由计算机控制并能垂直升降的观测架上,由另一数据采集器(polycorder)记录3个不同高度的冠层温度等,将每一层4个不同方位的观测值求平均作为这一层的冠层温度。本文使用的是中间一层的资料。

2 模型

露大部分在植物冠层顶部形成,单位叶面积最大露量大多发生在这里^[8,9]。因而模拟最长的露的持续时间时,一般考虑冠层顶部暴露于空中的水平叶片。露形成的一般原理是叶温 T_l 低于空气的露点温度,也就是当 $e_s(T_l) < e_a$ 时,开始结露。要模拟结露的持续时间和结露量,必须模拟叶温和一天中叶温随时间的变化,从而找出叶温降到其饱和水汽压等于空气的绝对湿度的温度时的时间,及上升到超过这一温度的时间,就可以估算一天中结露的起始时间和持续时间。本文模拟的结露的持续时间指的是结露开始到结束这段时间,而不是露在叶片上停留的持续时间。

本文为了模拟玉米的冠层温度,使用 Paw U^[7]的植物表面能量平衡方程:

$$R_i = \varepsilon_s \sigma T_s^4 + \rho C_p (T_s - T_a) / r_a + \rho C_p (e_s(T_s) - e_a) / (\gamma (r_s - r_a)) \quad (1)$$

式中 R_i 是植物的辐射平衡, ε_s 是植被辐射率, r_a 是边界层阻力, $e_s(T_s)$ 是植物表面温度 T_s 下的饱和水汽压 (P_s), e_a 空气是实际水汽压 (P_a), r_s 是气孔阻力。因为结露是水分自空气向叶表面凝聚, 所以气孔阻力对结露不起直接作用。在夜间, 气孔关闭。在清晨和傍晚, 太阳光较弱, 气孔开度也不大, 所以对叶温的调节作用很小。因此在模拟露的形成时, 忽略气孔阻力的作用。

对方程(1)作一些变动, 将其中左边的 R_i 项分解成短波辐射和长波辐射后得到:

$$R_i = \varepsilon_s \sigma T_s^4 - \varepsilon_a \varepsilon_s \sigma T_a^4 + \rho C_p (T_s - T_a) / r_a + \rho C_p (e_s(T_s) - e_a) / (\gamma \cdot r_a) \quad (2)$$

式中 R_i 是植被吸收的短波辐射, ε_a 是空气辐射率, ε_s 是植被对大气长波辐射的吸收率 ($=0.95$), 植被辐射率 $\varepsilon_s = 0.95$, 其它参数取值分别是 $\rho = 1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $C_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, $\lambda = 2.5 \times 10^4 \text{ J kg}^{-1}$, $\gamma = 66 \text{ Pa K}^{-1}$, T_a 为参考高度 z 处的气温。

作物冠层上的大气边界层阻力以中性条件下的公式近似表示:

$$r_a = \frac{\ln^2[(z-d)/z_0]}{k^2 u(z)} \quad (3)$$

其中, $u(z)$ 为 z 高度处的风速; d 为零平面位移 (作物 2/3 高度处); z_0 为粗糙度 (0.05 m); k 为卡曼常数 (0.41)。

空气辐射率用经验公式表达^[10]

$$\varepsilon_a = 0.79 - 0.174 \exp(-0.095 e_a) \quad (4)$$

1955年 Hofmann^[8] 对一个水平面能量平衡方程作了线性化处理。1963年 Monteith^[11] 将此处处理方法应用到与周围大气和叶片下部冠层进行能量交换的叶片。本文是利用能量平衡的单层模型(2)来模拟植物冠层的温度。此模型的特点是忽略了冠层顶部 150cm 的冠层下表面与其下层冠层之间的热量交换和长波辐射交换, 只考虑冠层上表面与大气的热量交换。

从方程(2)可以看到, 依赖于 T_s 的非线性项有植被的长波辐射和饱和水汽压二项, 解此等式通常用的方法有: (a) 线性化, 用一次 Taylor 或更高次的 Taylor 近似。虽然这种线性化方法比较简单, 可是它的精确度随着气-叶温差的增加而降低。(b) 解析法, 将公式(2)化为四次代数方程, 直接求多项式(2)的解析解, 取 4 个根中有物理意义的实根为植物表面温度^[7]。(c) 数值方法, 如 Newton-Raphson 迭代法, 其精确度随着迭代次数的增加而增加^[12,13]。

对方程(1), 如果用线性化 Taylor 近似展开, 求得 T_s 为:

$$T_s = T_a + (R_i - \varepsilon_s \sigma T_a^4 - h_e (e_s(T_s) - e_a) / (4 \varepsilon_s T_a^3 + H_i + h_e \cdot S)) \quad (5)$$

这里 S 为饱和水汽压曲线的斜率 ($= d(e_s) / dT$), h_e, h_i 分别为水汽和热量的传输系数:

$$h_e = \rho C_p / (\gamma r_a) \quad (6)$$

$$h_i = \rho C_p / r_a \quad (7)$$

如对方程(1)用更精确的二次 Taylor 展开, 求得的 T_s 为:

$$T_s = T_a (-b + (b^2 - 4ac)^{1/2}) / 2a \quad (8)$$

其中

$$a = 6 \varepsilon_s \sigma T_a^3 + (d^2 e_s / dT^2) h_e / 2 \quad (9)$$

$$b = 4 \varepsilon_s \sigma T_a^2 + h_e + h_e \cdot S \quad (10)$$

$$c = -R_i + \varepsilon_s \sigma T_a^4 + h_e \cdot e_a \quad (11)$$

这里的 a, b, c 分别是中间变量, $d^2 e_s / dT^2$ 是 e_s 对 T 的二阶导数。

假如把 $e_s(T_s)$ 近似地写成 T_s 的四次多项式

$$e_s(T_s) = \zeta + \alpha T_s + \beta T_s^2 + \psi T_s^3 + \mu T_s^4 \quad (12)$$

那么式(1)将化成一个四次多项式:

$$T_s^4 + a' T_s^3 + b' T_s^2 + c' T_s + d' = 0 \quad (13)$$

式中的 $\zeta, \alpha, \beta, \psi, \mu$ 和 a', b', c', d' 均是方程中的中间变量。

求解此方程首先将它化成三次多项式,得到两个复根和一个实根,用此实根将三次多项式化成二次多项式,那么所求得的合理解就是 T_s 。

为了求得冠层温度,在求解此非线性方程时,对非线性项 T_s^4 和 $e_s(T_s)$ 不作任何线性化处理,也没有用气温下的饱和水汽压代替冠层温度下的饱和水汽压求得直接解,而是用数值迭代方法求得其数值解。

如果对等式(1)用 Newton-Rapson 迭代法求解,则令:

$$f(T_i) = -R_s + \epsilon \sigma T_s^4 + h_r(T_i - T_a) + h_e(e_s(T_i) - e_a) \quad (14)$$

那么

$$f'(T_i) = 4\epsilon \sigma T_s^3 - h_r + h_e \cdot S \quad (15)$$

$$T_{i+1} = T_i - f(T_i)/f'(T_i) \quad (16)$$

先给定一个 T_0 ,然后计算 $T_1, T_2, \dots, T_i, T_{i+1}, \dots$, 当 $|T_i - T_{i+1}|$ 小于一个很小的正数时迭代结束,则 T_{i+1} 的最后迭代值就是 T_s 。

对非线性项 $e_s(T_s)$ 的处理,除了上面所说的多项式超越方程外,本文应用的是通用的计算饱和水汽压的 Goff-Gratch 公式,即:

$$\log E = a_1(1 - T_1/T) + a_2(\log(T/T_1) + a_3[1 - 10^{a_4(T_1/T_1 - 1)}] - a_5[10^{a_6(1 - T_1/T)} - 1] + a_7 \quad (17)$$

其中 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ 是经验系数, E 是温度 $T(K)$ 下的饱和水汽压(Pa), $T_1 = 273.16K$, 是水的三相点温度。

为了计算结露量,对应公式(2),潜热通量为:

$$\lambda E = \rho C_p(e_s(T_s) - e_a)/(\gamma \cdot r_a) \quad (18)$$

其中

$$e_a = e_s(T_w) - A \cdot P \cdot (T_a - T_w) \quad (19)$$

式中, $e_s(T_w)$ 为湿球温度 T_w 下的饱和水汽压(Pa), A 是百叶箱通风干湿表测湿系数($=0.000667$), p 是气压,为 1.1×10^5 (Pa), $e_s(T_s)$ 和 $e_s(T_w)$ 的值通过公式(17)求得。

本文的 T_s 是通过式(2)来估算的,再用估算的 T_s 求出 $e_s(T_s)$,就可求得每天结露的持续时间。等式(2)是关于 T_s 的非线性方程,联立方程(2)、(17)、(18)、(19),给定一组环境因子 T_a, T_w 和 u 等,求解该方程,即可获得不同时刻的 T_s ,本文使用 Newton-Rapson 数值迭代法,求得 T_s 后,再求 $e_s(T_s)$,然后通过公式(18)求得 λE 。

3 结果与讨论

图1显示了玉米冠层温度的实测值和模拟值。图中13个点的资料取自1995年9月8日到9月12日典型的辐射型天气。由于叶温的采集器尚需人工监视,为每小时采集一次数据,所以数据量不大。经统计,实测值与模拟值之间的相关系数为0.89。从图中看出,用公式(2)模拟的 T_s 与实测冠层温度相比很一致,可以用此模型模拟植物表面温度。本文最终模拟的是结露的持续时间,模型只考虑夜间情况。

图2a、b、c、d 为1995年玉米乳熟期共4d 的干湿球温度实测值和模拟的结露的持续时间和结露量。从图2中可看出,4d 的干球温度 T_a 和湿球温度 T_w 总的日变化趋势是:大体上从清晨太阳升起开始温度逐渐升高,且干球温度高于湿球温度,相对湿度逐渐下降。在14:00左右温度逐渐下降,到17:00左右起干球温度低于湿球温度。干湿球温度是每5min 得到一个数据,形成连续的曲线。与此相对应,模拟的结露量也是连续变化的露大致是从湿球温度开始高于干球温度前1h 左右形成,

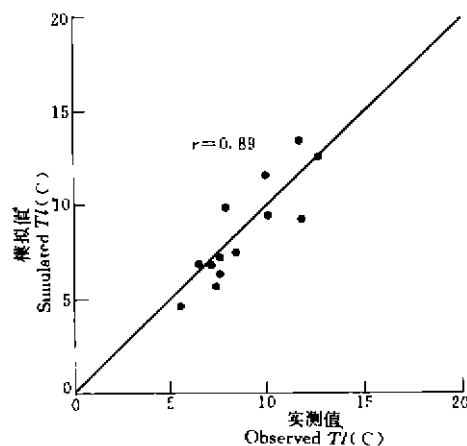


图1 玉米冠层温度的实测值与模拟值
(禹城,1995-09-08~1995-09-13)

Fig. 1 The measured and simulated values of maize canopy temperature (Yucheng, Sep. 8~13, 1995)

到湿球温度低于干球温度后1h左右结束。

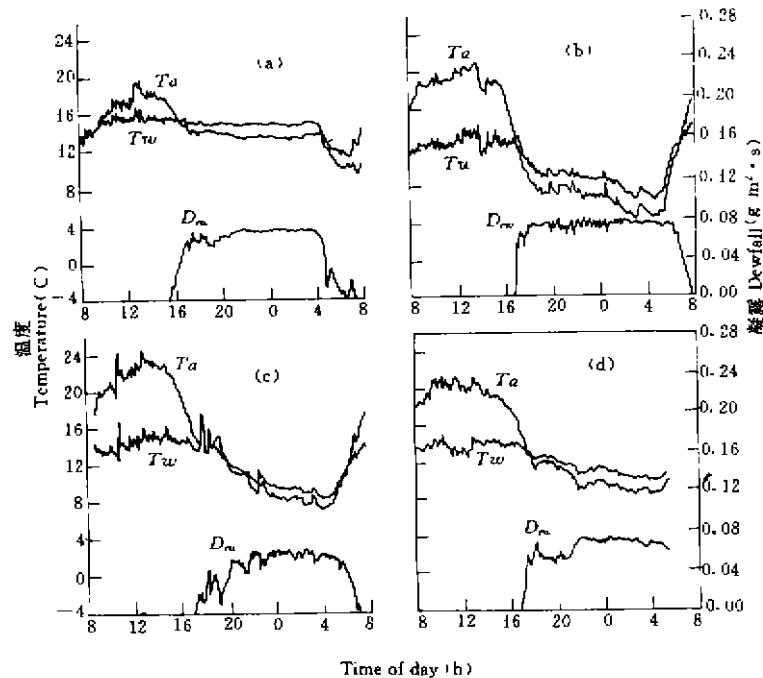


图2 2.5m 高度干湿球温度日变化和模拟的冠层结露速率

(禹城,1995年09月 a,8~9;b,9~10;c,10~11;d,11~12)

Fig. 2 The diurnal changes of measured dry and wet bulb temperatures and the simulated dewfall

(Yucheng, (a)8~9; (b)9~10; (c)10~11; (d)11~12, Sep., 1995)

一天中露的形成大致可分为3个阶段,一是起始阶段,约10~20min,结露速率增加急剧。二是稳定阶段,约结露后20min至结束前20min的大部分时间内,维持一相对稳定值约 $0.05 \sim 0.07 \text{ gm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。三是结束阶段,结露量迅速下降直到为零。由此可见,露在边界层中对空气温度的意义,即露由降温引起,但露的形成释放潜热。这种反馈对温度的下降有一定的调节作用。本文模拟的结果与观测期间的天气相关。在所观测时段9月8日前有一次冷空气过境和一次降雨过程,大气湿润,气温很低,有利于露的形成。从图2a可见,9月9日,露的出现时间特别早,大致发生于 $T_w > T_a$ 之前1h,即16:00左右。而以后的3d里,露的出现时间较晚,大约在17:00左右。

图3为1996年玉米灌浆期冠层干湿球温度和结露速率。与图2相比,结露的时间进程大致相同,但与1995年相比,夜间干湿球温度较接近,湿球温度高于干球温度的时间较短(结露时间),结露量也较低。

本文模拟的结果同前人所作的实验工作颇为符合^[1,5,6],本文所用的能量平衡单层模型,只需提供实测的小气候观测资料就能用来研究不同地区、不同作物冠层结露的持续时间和结露量的估算。如要从露的预报模型中完全消除经验成分和简化成分,还必须结合更为复杂的作物模型和通过气象资料预报作物环境的一个边界层模型。由于对植物真菌生长特别是孢子萌发有意义的是露水在叶片上的停留时间,即露的持续时间,它比结露时间还多一段叶面上已有的露蒸发至干所需的时间。因为叶面上能附着的露水量不多,又处于冠层的上方,因而蒸发所需时间不长。但是超过叶面负荷量的露水下滴或下流到冠层中下部的叶或茎上的露水,其蒸发所需时间要长得多。如果考虑这个问题,需了解结露停止后,叶面上露的量。如果要模拟冠层中不同层次的露的持续时间就更复杂,需要利用分别考虑冠层中不同层次以及土壤层的多层模型。

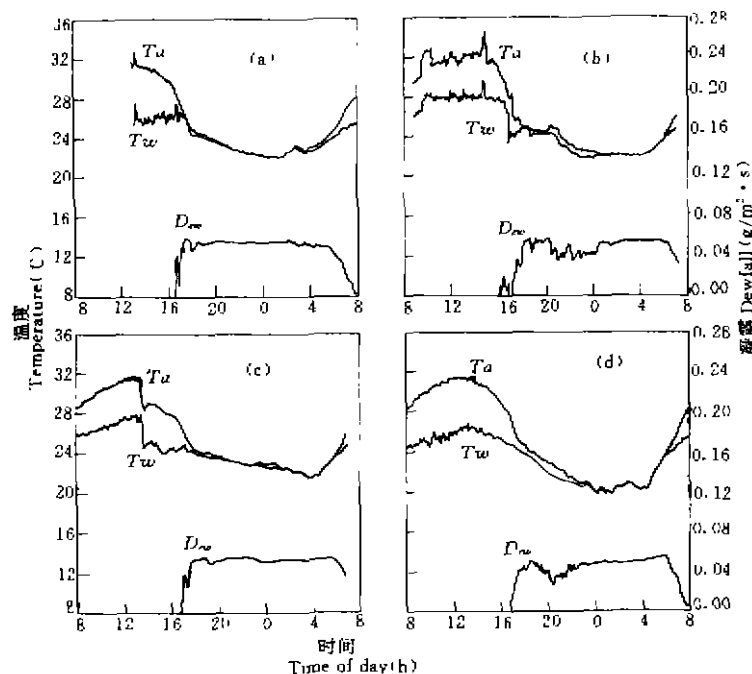


图3 冠层中2.5m处干湿球温度日变化和模拟的结露速率
(禹城,1996年8月 a,15~16;b,16~17;c,17~18;d,19~20)

Fig. 3 The diurnal changes of measured dry and wet bulb temperatures and the simulated dewfall
(Yucheng, (a)15~16; (b)16~17; (c)17~18; (d)19~20, Aug., 1995)

参 考 文 献

- 1 Wittich K P. Some remarks on dew duration on top of an orchard. *Agri. For. Meteorol.*, 1995, **72**:167~180
- 2 Crowe J M, Coakley S M and Emge R G. Forecasting dew duration at Pendleton, Oregon, using simple weather data. *J. Appl. Meteorol.*, 1978, **17**:1482~1487
- 3 Pedro Jr M J and Gillespie T J. Estimating dew duration. I. Utilizing micrometeorological data. *Agric. Meteorol.*, 1982a, **25**:183~196
- 4 Pedro Jr M J and Gillespie T J. Estimating dew duration. II. Utilizing standard weather station data. *Agric. Meteorol.*, 1982b, **25**:297~310
- 5 Gillespie T J and Barr A. Adaptation of a dew estimation scheme to a new crop and site. *Agri. For. Meteorol.*, 1984, **31**:289~295
- 6 Lhomme J -P and Jimenez O F. Estimating dew duration on banana and plantain leaves from standard meteorological observations. *Agri. For. Meteorol.*, 1992, **62**:263~274
- 7 Paw U K T. Mathematical analysis of operative temperature and energy budget. *J. Therm. Biol.*, 1987, **12**:227~233
- 8 Hofmann G. Die Thermodynamik der Taubildung. *Ber. Deutschen Wetterdienstes*, 1955, **3**(18):125~140
- 9 Jacobs A F G van Pul W A J and van Dijken A. Similarity moisture dew profiles within corn canopy. *J. Appl. Meteorol.*, 1990, **29**:1300~1306
- 10 Vogel C A, Baldocchi D D, Luhr A K *et al.* A comparison of a hierarchy of models for determining energy balance components over vegetation canopies. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, **34**:2182~2196
- 11 Monteith J L. 1963. Dew, facts and fallacies. In: A. J. Rutter (Editor), *The Water Interactions of Plants*, a Symposium of the British Ecological Society, London, 5~8 April 1961. 37~56
- 12 Gates D M and Papian L E. *Atlas of energy budgets of plant leaves*, Academic Press, New York, 1974
- 13 Tracy C R, van Berkun F H, Tsugi J S *et al.* Errors resulting from linear approximations in energy balance equations. *J. Therm. Biol.*, 1984, **9**:261~264
- 14 Jones H G. *Plants and microclimate (a quantitative approach to environmental plant physiology)*. Cambridge University Press, London, 1983. 186~193