

防风林裸田与湿润农田 热量平衡比较*

刘树华 张霄琛 陈家宜**

(北京大学地球物理系)

提 要

本文采用防风林干旱裸田和湿润小麦植被农田中的实测资料,应用热量平衡方法,计算了近地面层各通量密度。结果表明:在干旱防风林裸田中,净辐射的45%左右作为感热而散失,蒸发潜热只占35%左右,而土壤贮存的热量约占20%,并且林网具有明显的湿润空气效应。在湿润的小麦植被农田上,几乎净辐射的全部热量都用于潜热蒸散。有较强热平流时,潜热蒸发项甚至大于净辐射项。而感热几乎全天为负值。土壤热通量密度的比例只占净辐射的5%左右。文中对波文比及各通量密度做了误差分析。

一、引 言

近地面层热量平衡的分配结构,表征着大气与地面之间的湍流交换强弱,直接依赖于大气温度、湿度、风速、表面植被状况和土壤水分含量等因素,是农业生产潜力研究的基础工作之一。因此,近年来国外气象学家,生态学家,地理学家等已在这方面做了大量的研究工作^{[1]—[10]}。本文采用从湿润麦田及干旱防风林田上的实测资料,利用热量平衡方法分别计算了感热通量密度(H)和潜热通量密度(λE)的日变化特征。目的在于揭示湿润农田与防风林干旱裸田中,热量平衡各项分配上的差异。

在使用热量平衡法计算近地面层感热和

潜热通量密度的过程中,必须精确测定波文比。波文比取决于可利用能在潜热和感热中的分配。波文比一般可通过测量两个高度上的干湿球差计算获得。但是,由于干湿球差的数值通常较小(一般零点几度)。因此,测量过程中各种误差使得温差的测量精度较低。人们往往采用3种方法提高测量精度。一是采用多层高度的观测,根据干湿球廓线确定所需层次的干湿球温差;二是采用适当增加两层高度差,但此法往往受内边界层及场地的限制,并且在较干旱地区,此法对干湿球温差的测量精度提高不明显;三是观测中在适当的高度上周期性地上下交换仪器,取适当高度上测量结果的平均值,这样在高度差足够大的情况下,既消除了系统误差,又提高了观测精度。本文采用了一、三种方法。

* 本文为国家自然科学基金资助项目。

** 参加该工作的还有陈重,刘和平及中科院沈阳生态所朱延耀,孔凡智,王述礼,周广胜,金昌杰等。

二、试验场地及仪器

1. 北京大屯生态试验站场地及仪器

1984年4月17日至6月8日,在中国科学院北京大屯生态试验站的麦田中,进行了5次农田微气象联合观测。

观测场地开阔、平整。试验期间主导风向(SW)上,有大于600m的“来流路径”可供装设在作用面以上高达4m的各类仪器作梯度测量,并保证其数据的代表性。

应用波文比热量平衡方法计算田间感热和潜热通量,是目前国际上公认的一种较成功的方法。但它要求精确测出两个高度上的干湿球温差 ΔT 和 ΔT_w 。为了精确地测量 ΔT , ΔT_w ,我们采取了3个措施:(1)增加探头的灵敏度(采用了五对热电偶);(2)增加两个测量高度差;(3)采用了自动翻转系统,消除了仪器误差。 ΔT , ΔT_w 的输出信号由电缆输入到观测室,由1905A型精密微伏级数字电压表自动采集。

净辐射通量密度 R_n ,采用Co-1型通风式净辐射表测量。观测高度为1.6m。输出电动势由1905A型精密微伏级数字电压表连续采集,并利用表的内部程序控制采样30分钟,且自动取得平均值。

土壤热通量密度 G ,采用CN-3型土壤热流量仪测量,该仪器埋设和测量较方便,但代表性较差,因此本文采用了作物行间不同位置3点测量取其平均的方法来提代 表性。

2. 乾安试验场地及仪器

1989年5月,在吉林省乾安县防风林田内,进行了为期20天的大气边界层及微气象观测。防风林田南北方向长1300m,宽250m,林带宽15m,树高9m,林网田为播种前裸地。

风速 u 、干球温度 T_d ,湿球温度 T_w 及气压 P 由TS-3B1型系留气球系统测量。测量高度为2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 19m。取样长度为30分钟,在30分钟内各高度上下

测两个循环,然后取平均。数据在主机上编程控制自动打印。

净辐射通量密度 R_n ,采用MPI200D型通风自动打印净辐射表,测量高度1.5m,打印每小时积分值。土壤热通量密度 G ,采用CN-3型土壤热流量仪。

三、计算方法

地表面热量平衡方程可表示为:

$$R_n - G = H + \lambda E \quad (1)$$

为了从方程(1)中确定感热通量密度 H 和潜热通量密度 λE ,引入波文比定义:

$$\beta = H / \lambda E \quad (2)$$

近地面层垂直热量和水汽的扩散可分别表示为:

$$H = \rho c_p K_h \partial T / \partial z \quad (3)$$

$$\lambda E = \rho \lambda K_w \left(\frac{0.622}{P} \right) \partial e / \partial z \quad (4)$$

式中 ρ 为大气密度(1.2837—0.0039T) ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); c_p 为定压比热($1004 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); λ 为汽化潜热($2.5 \times 10^6 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$); P 为大气压力(hPa); K_h 、 K_w 分别为热量和水汽扩散系数($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); e 、 T 分别为水汽压(hPa)和温度($^{\circ}\text{C}$)。

在实际计算中,一般近地面层有植被时,热源和水汽源不在同一平面上(水面和裸地表面可认为是同一平面)。土壤不太湿润时,水汽蒸发源应为作物表面(土壤蒸发与作物蒸腾之和),而热源则位于株高2/3处。另外,植株底部湍流交换弱,而作物上部湍流较大而交换较强。此时,计算中不能假设 $K_h = K_w$,只有当传递水汽和传递热量的湍流通过混合取得一致时,才能取 $K_h = K_w$ 。本文农田温、湿测量高度为作物的1.2—1.8倍之间,并位于气流的边界层内,试验中检验了不存在风温水平梯度。因此,计算中可假设 $K_h = K_w$,并且温湿测量高度相同。则波文比可简化为:

$$\beta = \gamma \Delta T / \Delta e \quad (5)$$

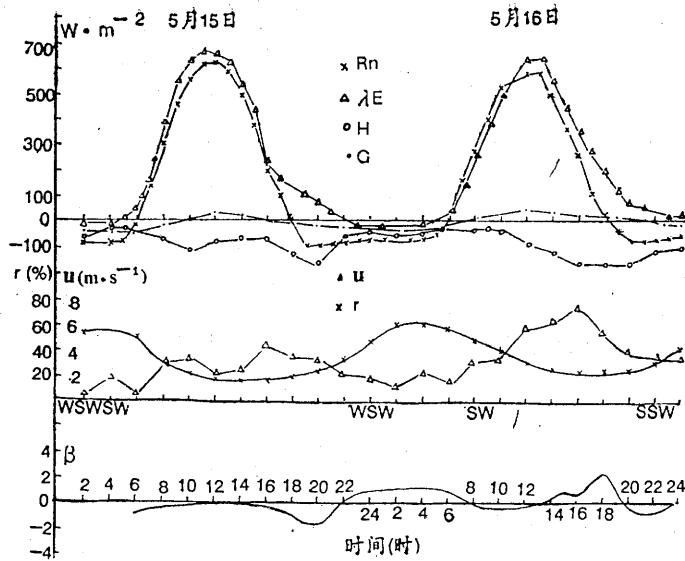


图1 大屯1.5m热量平衡各项、风速、相对湿度和波文比日变化

式中 γ 为干湿表常数($0.667\text{hPa}\cdot\text{C}^{-1}$)； ΔT 、 Δe 分别为两层的温、湿度差， Δe 由下式求得：

$$\Delta e = E(t_{w2}) - E(t_{w1}) - AP[(t_{d2} - t_{d1}) - (t_{w2} - t_{w1})] \quad (6)$$

式中 $E(t_{w2})$ 和 $E(t_{w1})$ 分别为两层的湿球温度时的饱和水汽压值(hPa)； A 为干湿表系数(6.4×10^{-4})。

由(1)、(2)式可得：

$$\lambda E = (R_n - G) / (1 + \beta) \quad (7)$$

$$H = (R_n - G) \beta / (1 + \beta) \quad (8)$$

由此，根据实测的 R_n 、 G 和 β ，即可由(7)、(8)式求得相应的 λE 和 H 。

四、结果及误差分析

1. 结果分析

图1—3为计算得 λE 、 H 和实测的 R_n 、 G 的个例日变化图。图中还同时标出了地面风速(u)，相对湿度(r)和波文比(β)值，作为天气条件的参考。由图1可见，在湿润的小麦植被农田中， λE 的大小主要依赖于 R_n 的强弱， R_n 的绝大部分能量都应用于 λE 的消耗。5月15日、16日为盛行西南风的干燥天

气，热平流较强，气温高于蒸发面的温度，有显热传给蒸发面，从而加大了蒸发量。可看出，5月15日全天为干燥西南风，所以 λE 全天都大于 R_n 值，而 H 全天为负值。这就是说，大气中通过感热传导补充给蒸发表面，从而加大了蒸发表面的潜热蒸散。同时也看到，进入土壤贮存的热量也很小。并且风速越大，空气越干燥，从蒸发面蒸散到大气的

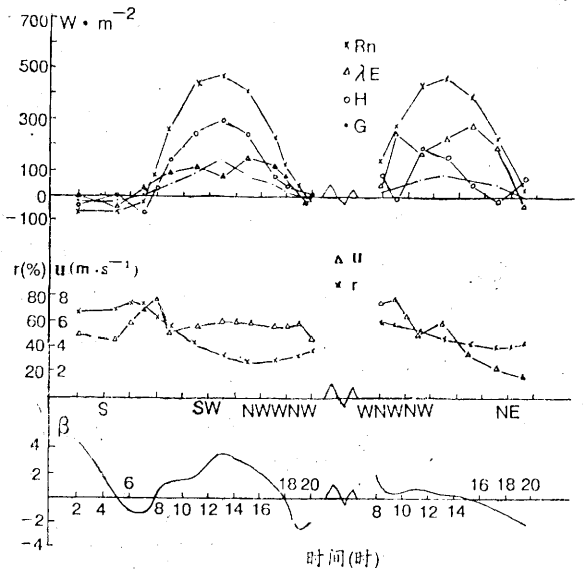


图2 乾安林网内4m热量平衡各项、风速、相对湿度和波文比日变化

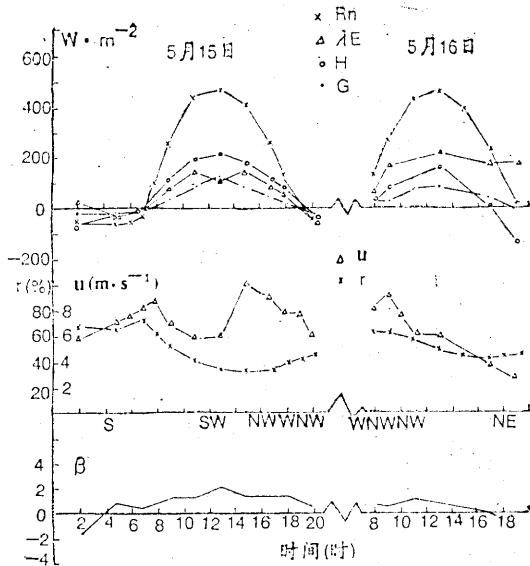


图3 乾安林内14m热量平衡各项、风速、相对湿度和波文比日变化

潜热通量密度就越大。波文比一般较小，白天在 ± 0.4 以内，夜间也一般小于2。

图2、3为播种前干燥裸地防风林带田中的热量平衡。由此看出，地表面土壤含砂量

较大的裸田，地表反射率较大，因此， R_n 的值较植被湿润农田小，仅占88%左右，而 λE 较小，占净辐射的35%左右，感热通量密度 H 要占净辐射通量密度的45%左右，进入土壤中的热流量较大，占净辐射通量密度的20%左右。而且，林网有较明显的湿润空气效应，由图2、3看到，S、SW风向林网较稀，而NW、WNW方向林网较稠密，在此方向距观测点300m以外有宽上百米的林带网。从而看出盛行NW和WNW风时， λE 有明显变大趋势，相对湿度也相应增加。所以，防风林不仅防风固沙，调节热量平衡各项的重新分配，还增加了大气的湿度。

图4为大屯湿润小麦植被农田1.5m处5月10—20日以及乾安干旱裸田5月12—20日，4m和14m处热量平衡各项的平均值日变化图。从图4中可明显看出，干旱裸地防护林带田内净辐射通量密度、潜热通量密度明显减小，而感热通量密度、土壤热通量密度明显增加。

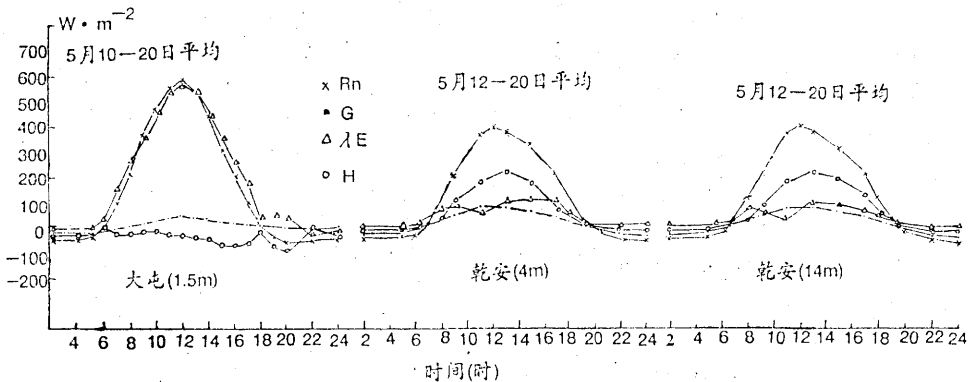


图4 热量平衡各项平均日变化的比较

由图1—3还可看出，波文比值也有明显的日变化。湿润农田的波文比较稳定，白天为负，晚上为正。而干旱防风林田下层波文比白天为正，晚上为负，防风林上层波文比与下层趋势一致，但变化幅度小。湍流热通量取决于交换系数和温度垂直梯度，干旱农田湍流热通量是热量平衡方程的主要支出项，因此，形成干燥炎热的小气候。而湿润

农田，蒸发是热量平衡方程的主要支出项，湍流热交换较小，形成比较缓和的温度日变化环境。另外，较干旱的防风林田内，4m和14m处潜热蒸发最高值均偏向上午出现，午后湍流交换虽有加强，但由于土壤水分不足，日出后不久土壤上层就干化了，可供蒸散的水分变小；而14m处，虽有林网的蒸散贡献，但由于空气干燥，中午前后气孔闭合，故最

高蒸发也出现在上午。但盛行NW和WNW风时,就非如此。

2. 误差分析

通量密度各项的误差依赖于实际观测精度,下面我们利用微分法对其各项进行误差分析。

假设 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

y 的相对误差是:

$$\frac{\delta y}{y} = \frac{\partial y}{\partial x_1} \frac{\delta x_1}{y} + \frac{\partial y}{\partial x_2} \frac{\delta x_2}{y} + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} \frac{\delta x_n}{y} \quad (9)$$

在热量平衡方法中,引起感热和潜热通量密度误差的量有 β , R_n 和 G ,而 β 值精度又取决于 ΔT 和 ΔT_w 的观测精度。

(1) β 值的相对误差

当两个高度的温度和湿度不太大时,经过简单推导可得:

$$\beta = \left(\frac{K_h}{K_w} \left[\left(\frac{s+\gamma}{\gamma} \right) \frac{\Delta T_w}{\Delta T} - 1 \right]^{-1} \right) \quad (10)$$

$s+\gamma$ / γ 的合成误差比温度梯度观测所导致的误差要小,因此,该误差讨论中忽略不计。假设 $K_h = K_w$, 将(10)式代入(9)式整理得:

$$\frac{\delta \beta}{\beta} = (1 + \beta) \left| \frac{\delta \Delta T_w}{\Delta T_w} + \frac{\delta \Delta T}{\Delta T} \right| \quad (11)$$

(2) λE 的相对误差

将(7)式代入(9)式可得:

$$\frac{\delta \lambda E}{\lambda E} = \frac{\delta R_n - \delta G}{(R_n - G)} - \frac{\delta \beta}{1 + \beta}$$

为了获得最大相对误差上式改写为:

$$\frac{\delta \lambda E}{\lambda E} = \frac{\delta R_n - \delta G}{(R_n - G)} + \frac{\delta \beta}{1 + \beta} \quad (12)$$

(3) H 的相对误差

同理将(8)式代入(9)式得:

$$\frac{\delta H}{H} = \frac{\delta(R_n - G)}{R_n - G} + \frac{\delta \beta}{\beta(1 + \beta)} \quad (13)$$

实际观测中, dT/dz 和 de/dz 的误差可达8%左右,所以, β 最大误差可达16%左右,但(7)、(8)式中分母是 $\beta+1$,所以,

当 $\beta=1$ 时,误差可为8%,而当 $\beta=0.5$ 及0.1时,误差分别为6%和1.5%。所以通过计算过程还可减小误差,并且, β 的绝对值越小,误差也越小,准确率越高。

五、结论与讨论

通过本文计算结果得出几点结论如下:

(1) 在湿润植被农田中,由于反射率较小,净辐射通量密度较大,潜热通量密度也较大,几乎净辐射能量全部应用于蒸发。特别在干燥热平流较强时, λE 甚至大于 R_n 。而感热通量密度全天为负。土壤热通量也很小,最大时仅占净辐射能的8%左右。

(2) 在干旱裸地防风林田中,由于地表反射率较大,净辐射通量密度较小,潜热通量密度只占净辐射能的35%左右,并且上午9时以后,随净辐射通量密度的增加有时出现减少。有较多的能量通过感热交换传输到大气中,感热通量密度占净辐射的45%左右,或者通过土壤向地表深处输送,土壤热通量密度占净辐射的20%左右。并且发现林网有明显的湿润空气效应。

(3) 热量平衡方法在实际应用中,一般在 $-0.4 < \beta < 0.4$ 范围内精度较高^[11]。所以大部分使用此法的研究都是针对灌溉农田、牧场或森林等各种植被的情况。然而在十分干燥的地表条件下, β 值很大且为正,或在能量平流较强时, β 为负值,这时此法就不太准确了。特别当 $\beta \rightarrow -1$ 时,由公式(7)、

(8)显见,误差将非常之大。

(4) 林网内计算14m处的热量平衡各项时应用1.5m处的 R_n 值,可能低估了各项的值。湿润农田中热平流对热量平衡各项的影响数量上究竟有多大,有待进一步研究。¹

参 考 文 献

- (1) Rider, N. E., and Robinson, G. D., A study of the transfer of heat and water vapor above a surface of short grass, Q. J. R. Met. Soc. 77, pp375-401, 1951.
- (2) Tamer, L. B., Energy balance approach

- to evapotranspiration from crops, Soil. Sci.Soc.Amer. Proc., 24, pp1-9, 1960.
- (3) Crawford, T.V., Moisture transfer in free and forced convection, O.I. R. Met. Soc, 91, pp18-27, 1965.
- (4) Dyer, A.J., The turbulent transport of heat and water vapor in an unstable atmosphere, Q.J.R.Met. Soc, 93, pp.501-508, 1967.
- (5) Swinbank, W. C., and Dyer, A. J, A-experimental study in micro-meteorology, Q.I.R.Met.Soc, 93, pp, 494-500, 1967.
- (6) Gadd, A.J., and Keers, J.F. Surface exchanges of sensible and latent heat in a 10-level model atmosphere, Q.J.R.Met. Soc, 96, 297-308, 1970.
- (7) Athory, J.B., Samuel, Z.O.,The observation and simulation of diurnal evaporation contrast in an Alaskan Alpine pass, J. of Appl. Met., 12, pp. 1134-1143, 1973.
- (8) Blaine, L.B., and Norman, J.R., Lysimetric calibration of the Bowen ratio---energy balance method for evapor transpiration estimation in the Central Great Plains, J. of Appl. Met., 13, pp. 227-236, 1974.
- (9) Grant, D.R., Comparison of evaporation measurements using different methods, O. J.R. Met. Soc., 101, pp. 543-550,1975.
- (10) Huband, N.D.S., and Monteith, J.L., Radiative surface temperature and energy balance of wheat canopy, B.L. Met., 36 pp.107-116, 1986.
- (11) 刘树华, 农田水分蒸散计算方法的比较, 北京大学学报, Vol 25, No.5, pp594-604, 1989.

Comparison of the heat balance between the dry bareland with windbreak and the moist wheat field

Liu Shuhua Zhang Aichen Chen Jiayi

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

In this paper, the sensible heat flux and the latent heat flux have been calculated using the heat balance method and the information based on the dry bareland with windbreak and the moist winter wheat field. The results are: in the dry bareland with windbreak, 45% of the net radiation is dispersing as sensible heat flux, 35% as latent heat flux, and only 20% is stored in soil. The Bowen ratio is greater, usually within range $-2 < \beta < 2$. In the moist winter wheat field, almost all the net radiation contributes to the latent heat flux. But the sensible heat flux almostly appears negative in the whole day. The soil heat flux content is only 5% of the net radiation. The Bowen ratio usually within range $-1 < \beta < 1$. In this paper, the errors of the Bowen ratio and the flux are also discussed.