

## 鹤山丘陵草坡热量平衡

张绍贤 黎 瑜 黄录基

(广州地理研究所, 广州 510070)

### 摘 要

为了揭示南亚热带坡地小气候特征,于1989年8—9月和12月在广东鹤山丘陵综合试验站进行了热量平衡及其各分量的观测研究。观测结果表明,夏季蒸发耗热是主要热量支出项,鲍文比值 $\beta < 1$ ;冬季蒸发耗热与全天净辐射的比值显著减少,净辐射绝大部分供给了湍流热通量, $\beta$ 值也远大于3,说明此时期水分条件十分欠缺。可以认为,在鹤山丘陵草坡的改造利用方面,如何有效地改善旱季的水分条件,是一个比较重要的研究课题。

**关键词:** 丘陵草坡; 热量平衡; 水分条件

### 前 言

下垫面不均匀性形成的水热条件的差异,主要是由于获得太阳辐射量不同而产生的。下垫面热量平衡是决定贴地气层与土壤上层气候特性的物理基础,同时也是影响农业生产力的重要因素。当今改造气候条件的措施,都着眼于改变下垫面的条件,从而使热量平衡各分量向着有利的方面转变。因此,人们在研究某一生境系统的小气候特征时,首先很重视进行热量平衡的研究。

中国科学院鹤山丘陵综合试验站位于广东珠江三角洲边缘的低丘陵区。自1984年以来,中国科学院华南植物研究所与鹤山县林科所协作在试验站内重建各种人工林型。为了配合南亚热带人工森林生态系统综合实验研究,我们将开展一系列有关不同植被结构的水文气候观测实验,旨在取得基础资料,为研究各种人工林类型的建群植物群落的生产力提供理论依据。本文是在试验站草坡上进行热量平衡和蒸散观测试验的初步报告。

### 理 论

下垫面与大气之间的热量交换,主要是依靠湍流运动进行的。通常,可用湍流扩散方程来表示显热通量和潜热通量:

$$H = -\rho C_p K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (1)$$

$$LE = -\frac{\rho \epsilon L}{P} K_e \frac{\partial e}{\partial z} \quad (2)$$

其中,  $C_p$  为空气定压比热,  $\rho$  为空气密度,  $K_h$ 、 $K_e$  分别为热量和水汽的湍流交换系数,  $\epsilon$  为水的分子量与空气分子量之比,  $L$  为水的汽化潜热,  $P$  为大气压,  $\partial \theta / \partial z$ 、 $\partial e / \partial z$  分别为气温和水汽压垂直梯度。把方程 (1) 除以方程 (2), 即得到著名的鲍文比  $\beta$ , 并以有限差分形式表示:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{C_p P}{\epsilon L} \frac{K_h}{K_e} \frac{\Delta \theta}{\Delta e} \quad (3)$$

一般, 能量平衡方程可写成:

$$R_n = G + H + LE \quad (4)$$

式中  $R_n$  为净辐射,  $G$  为土壤热通量,  $H$  为显热通量,  $LE$  为潜热通量。经过简单的数学处理, 方程 (4) 可以写为:

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \frac{H}{LE}} \quad (5)$$

以方程 (3) 代入方程 (5), 假定水汽湍流交换系数与显热湍流交换系数相等, 取  $C_p = 0.24 \text{ cal}^1 / \text{g} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $P = 1000 \text{ mb}$ ,  $\epsilon = 0.622$ ,  $L = 585 \text{ cal/g}$ , 即得到潜热和显热通量的计算式:

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + 0.66 \frac{\Delta \theta}{\Delta e}} \quad (6)$$

$$H = \frac{R_n - G}{1 + 1.52 \frac{\Delta e}{\Delta \theta}} \quad (7)$$

## 测定条件

测定仪器的整套设备比较轻便, 仅用直流电, 以适应野外操作的需要, 仪器的性能经得起高温和暴雨的天气条件。净辐射表 (CM-1 型, 澳大利亚米特利顿公司) 装设在地面上 1.5m 高处进行净辐射 ( $R_n$ ) 的测定。采用一个带有机玻璃圆顶的净辐射表测定总辐射。两个辐射表都有充气装置, 充气通道附有干燥剂。土壤热通量采用四块土壤热流板 (610 型, 美国索恩韦特公司), 分别埋在土中 0.05m 深处, 然后取它们的平均值计算。对表面至 0.05m 间热储存的订正, 使用土壤体积热容量 (测定 0—0.05m 土层的温度变化率), 其温度变化的测定通过插入土壤表层的二极管温度表来进行。计算鲍文比时, 要求对  $\Delta \theta$  和  $\Delta e$  作精确的测定。为此, 采用性能较好的干湿球表装置, 其中的二极管温度表对温度测量的精度达到  $0.01^\circ\text{C}$ 。为进一步提高测定精度, 每经一定时间间隔, 把两个干湿球表的测定位置互相调换一次, 参照 McCaughey 的设计, 即用一个自动控制的直流电动机, 定时轮流变换每个干湿球表的测定装置<sup>[1]</sup>, 其时间间隔的控制由一数

据记录器 (Data Logger, CR-21 X 型, 美国堪贝尔科技仪器公司产品) 来实施, 本次实验的每次测定时间为 25 min, 经 5 min 时间进行位置调整。测定的数据由磁带输入微机。

测点位于鹤山丘陵综合试验站一草坡顶上, 地表面条件比较一致, 但场地太小, 迎风风浪区小于 50m。由于风区长度小, 我们将风速、温度和湿度的测量高度限制在地面上 80cm 范围内。观测期间为 1989 年 8 月 30 日至 9 月 3 日和 12 月 17 日至 20 日, 为了叙述方便起见, 下文将这两段时间代表夏季和冬季, 两段观测时间均为晴天。

## 结 果

在夏季晴天, 热量平衡各分量的日变化基本上是一致的, 中午达到最大值, 上下午

**表 1 热量平衡各分量的日变化**  
(1—1989 年 8 月 30 日至 9 月 3 日; 2—1989 年 12 月 19 日)

Table 1 Daily change of heat balance components in  
Heshan County, Guangdong Province  
1 Aug.30—Sep.3, 1989  
2 Dec.19, 1989

(cal·cm<sup>-2</sup>)

时 间 time	<i>R<sub>n</sub></i>		<i>G</i>		<i>LE</i>		<i>H</i>	
	1	2	1	2	1	2	1	2
0	-3.57	-3.51	-0.19	-0.15	-0.64	-0.91	-2.74	-2.44
1	-3.49	-2.40	-0.18	-0.12	0.37	-0.39	-3.67	-1.88
2	-3.25	-1.42	-0.18	-0.10	-0.36	-0.19	-2.71	-1.14
3	-2.87	-1.98	-0.17	-0.11	4.45	-0.46	-7.15	-1.41
4	-2.47	-2.41	-0.17	-0.12	-0.99	-0.22	-1.77	-2.07
5	-2.45	-1.41	-0.19	-0.10	-0.68	-0.18	-1.58	-1.13
6	-0.04	-1.25	-0.14	-0.09	0.24	-0.22	-0.14	-0.94
7	9.33	0.05	-0.03	-0.06	5.90	0.14	3.46	-0.03
8	22.57	5.28	0.09	0.04	12.01	2.11	10.47	3.12
9	31.94	11.65	0.41	0.14	22.44	2.81	9.09	8.71
10	46.56	17.93	0.84	0.29	29.02	2.20	16.70	15.44
11	49.00	14.89	0.98	0.27	32.41	1.74	15.62	12.88
12	50.50	22.79	1.31	0.42	34.12	3.99	13.49	18.37
13	47.60	24.54	1.22	0.49	31.21	2.78	16.63	21.28
14	44.77	20.30	1.00	0.36	26.76	3.54	17.00	16.40
15	29.79	10.82	0.50	0.20	20.51	0.55	8.79	10.07
16	19.21	2.50	0.25	0.01	13.80	0.41	5.15	2.08
17	9.12	-4.12	-0.02	-0.16	6.93	-1.12	2.21	-2.85
18	-1.62	-4.69	-0.19	-0.19	-2.96	0.65	1.52	-5.14
19	-3.47	-4.54	-0.23	-0.19	-9.11	0.27	5.86	-4.61
20	-3.21	-3.85	-0.22	-0.17	3.35	-0.71	-6.30	-2.97
21	-3.32		-0.21		4.65		-7.76	
22	-3.36		-0.20		6.84		-10.00	
23	-3.57		-0.20		-9.69		6.23	

大体呈对称分布。日间坡地向贴地气层输送热量，显热通量的最大值出现在正午前后一段时间。潜热通量的变化形式与净辐射相同，表明草坡地即便坡顶上的水分条件尚好，但午后蒸发耗热随净辐射的减少而下降，12—14时，热量消耗于湍流热通量上有所增加(图1)。冬季，热量平衡各分量的最大值，净辐射、显热通量和土壤热通量均出现在13时，潜热通量则出现在12时(图2)。冬季夜间逆温形成后，湍流热通量为负，因之稳定层结下湍流交换系数很小，故通量值也很小，平均约为夏季的50%(表1)。土壤热通

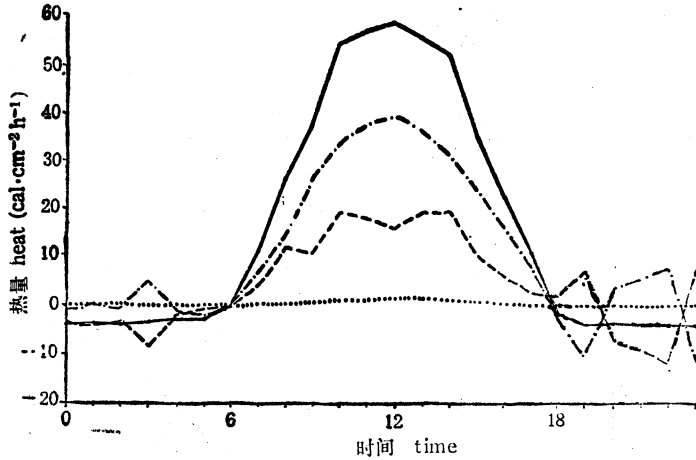


图1 热量平衡各分量的日变化(1989.8.30—9.3)

Fig. 1 Daily change of heat balance components in Heshan, Aug. 30—Sept. 3, 1989

——  $R_n$  ---  $H$  - · -  $LE$  .....  $G$

量日变化十分平缓，冬季夏季基本如此，热流更换符号的时间也基本相同，两次通过0的时间分别在上午7—8时和下午16—17时，最大值出现在12—13时，最小值在19时左右。

夏季，蒸发耗热是主要热量支出项，约为  $230 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ，占净辐射(全天)的71%。显热通量约为  $88 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ，只占净辐射的27%，但远大于土壤热通量。冬季，蒸发耗热与全天净辐射的比值显著减少，仅为17%，而湍流热通量却占83%，净辐射绝大部分供给了湍流热通量，说明这个时期水分条件十分欠缺(表3)。

土壤热通量与净辐射相比，只占2—7%，与其他分量比较，它的比重要小得多，但它直接影响大气和土壤中能量的变化。土壤热通量由夏季的  $4.1 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$  减至冬季的  $0.2 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ，其数值大幅度减少，反映了土壤异常的干燥。冬季，草坡植被发生

表2 热量平衡各分量与净辐射的比值 ( $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ )

Table 2 The ratio between heat balance components and net radiation

日期 date		$R_n$	$G$	$LE$	$H$	$H/R_n$	$LE/R_n$	$G/R_n$
1989.8.30—9.3 Aug.30—Sep.3 1989	白天 day	360.39	6.56	235.11	118.61	0.33	0.65	0.02
	夜间 night	-36.70	-2.46	-4.54	-30.21	0.82	0.12	0.07
	全天 whole day	323.70	4.10	230.57	88.40	0.27	0.71	0.01
1989.12.18—19 Dec.18—19, 1989	白天 day	130.76	2.16	20.27	108.33	0.83	0.15	0.02
	夜间 night	-41.85	-1.96	-5.33	-34.57	0.83	0.13	0.05
	全天 whole day	88.90	0.20	14.93	73.76	0.83	0.17	0.00

表3 绝文比值的比较

Table 3 Comparison of Bowen ratio

地方时 local time	鹤山草坡 hillslope in He- shan 8.31.1989	鹤山草坡 hillslope in He- shan 12.19.1989	海南岛热带季雨林 tropical monsoon forest in Hainan Island 3.23. 1982	加拿大花旗松林 <i>Pseudotsuga menziesii</i> forest in Canada 7.13-15, 1976	以色列干旱裸地 dry bare land in Israel 8.26. 1966
10	0.10	7.03	1.98	0.64	3.58
11	0.06	7.40			5.04
12	0.14	4.60	7.92	0.80	7.48
13	0.00	7.64			8.08
14	0.76	4.64	3.74		8.57
15	0.60	18.22		0.35	10.52
16	0.26	5.09	6.11		12.71
17	0.37	2.55		-0.16	4.22
18	-0.79	-7.91			1.07
19	-0.81	-17.30			
20		4.19	-0.44		
21	-1.24	-0.50		-1.52	

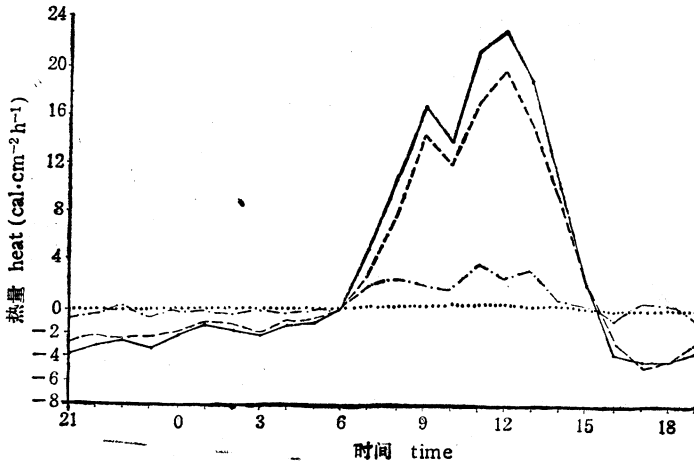


图2 热量平衡各分量的日变化 (1989.12.18-19)

Fig. 2 Daily change of heat balance components in Heshan, Dec.18-19, 1989

—Rn---H---LE---G

较大变化, 草枯萎使裸露的土面增大, 反射率增加, 下垫面粗糙度降低, 蒸腾作用也减至最小程度, 贴地气层水汽含量大为减小。

在没有大气平流时, 理论上鲍文比  $\beta$  可以变动在  $+\infty$  (无蒸发的干表面) — 0 (无显热消耗的蒸发湿表面) 之间<sup>[2]</sup>。若存在大气热平流,  $\beta$  可能变成负数。对于鹤山低丘草坡, 夏季的  $\beta$  值  $< 1$ , 表明蒸发面很湿润, 辐射能大部分都用于蒸散 (表4)。冬季的  $\beta$  值远远大于 3, 在表4中引用了文献[3]的资料, 以作比较, 可见冬季鹤山草坡顶上的干旱程度不逊于 Fuchs 举出的以色列干旱裸露地。

## 结 论

本区属亚热带季风气候, 温热多雨, 但降雨季节不均匀, 干湿季明显。华南丘陵

草坡的自然生产力很低, 远没有充分和合理利用太阳辐射能资源。可以预期, 随着人工植物群落的建立和成长, 下垫面粗糙度增加, 反射率和有效辐射减小, 生长季便可获得较多的辐射能。灌丛草坡的改造利用方面, 营造多年生植物和多样化结构群落, 有效地改善旱季的水分条件, 是一个值得重视的重要课题。

根据测定结果, 鹤山低丘草坡夏季晴天的蒸散量为 4.10mm, 冬季为 0.35mm。本文按照鲍文比能量平衡法进行蒸散测定, 对于夏季晴天, 使用效果很好, 测定结果的精度较高, 但夜间适用性较差, 冬季干旱期间的测定误差可能较大。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 徐德应、曾庆波, 1985: 用能量平衡一波文比法测定海南岛热带季雨林蒸散初试。热带亚热带森林生态系统研究, 第3集, 183—196。
- [ 2 ] Lockwood, J.G., 1985: World Climatic Systems. Edward Arnold Ltd., London, 174—175.
- [ 3 ] McCaughey, J.H., 1985: Development and field testing of an energy balance measurement system for climatic studies of energy plantations in Newfoundland. Final Report on Contract OSC84—00452. Supply and Services, Canada.

## HEAT BALANCE OF HILLSLOPES IN HESHAN

Zhang Shaoxian, Li Yu and Huang Luji

(Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070)

### Abstract

In order to reveal the microclimatic feature of hillslopes, the heat balance during the latter half of the year 1989 was measured at the Hilly Experimental Station in Heshan County which is situated in the central southern part of Guangdong Province, South China. Based on the results, it can be shown that the latent heat flux is the main heat consumption term in summer. The ratio between flux of latent heat (LE) and net radiation (R<sub>n</sub>) decreases obviously in winter. Most of the energy coming as net radiation goes into energy for the sensible heat flux (H), indicating the deficit of water for this period. It should be pointed out that it is an important task to improve water condition effectively during the dry season for the purpose of exploitation and utilization of hillslopes in South China.

**Key words:** Hillslope; Heat balance; Water condition