

鹤山南亚热带草坡生态系统的能量平衡

蔡锡安 任海 彭少麟 余作岳

(中国科学院华南植物研究所, 广州 510650)

摘要 本文以广东鹤山丘陵综合试验站草坡为研究对象, 分析了鹤山南亚热带草坡的能量平衡特征, 主要结果如下: 1. 辐射平衡的各分量中, 蒸发散耗热占净辐射的 74.7%, 其年变化幅度较大; 湍流热通量占净辐射的 21.2%, 其月变化没有明显的规律, 波动较大, 土壤热通量与其它分量相比, 其比重要小得多。2. 虽然鹤山年辐射量和降雨量较多, 但水热条件有几个月配合欠佳, 使得草坡的净辐射能有 90% 以上用于地面以上植被和空气湍流交换所消耗, 小气候条件较差, 影响了这一生态系统的生产潜力的发挥。3. 太阳辐射透过大气层以后, 仅有 $4775.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 左右的辐射能到达草坡, 草坡反射了 $822.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 其净辐射收入为 $2915.6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 净辐射收入中又有 $2077.8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 用于蒸散作用, $618.1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 用于湍流热交换, $87.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 用于土壤热交换, 植被贮热约 $38.8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 用于净光合作用耗热 $93.4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

关键词 能量平衡; 南亚热带; 草坡; 广东

THE CHARACTERISTICS OF HEAT BALANCE IN SUBTROPICAL HILLSLOPE ECOSYSTEM IN HESHAN

Cai Xi'an Ren Hai Peng Shaolin Yu Zuoyue

(South China Institute of Botany, Academic Sinica, Guangzhou 510650)

Abstract Heat balance in lower-subtropical hillslope ecosystem in Heshan Experiment Centre, Guangdong Province, was measured. The results indicated that the total evapotranspiration heat flux and the sensible heat flux were 74.7% and 21.2% of the net radiation, respectively. There was less heat storage in the soil and vegetation. Although the amount of gross solar radiation and precipitation was sufficient, the water condition did not match with the heat condition in several months, which decreased the productivity of vegetation.

Key words Heat balance; Hillslope ecosystem; Guangdong Province

在植物生态学研究中, 能量因子的研究一直是非常重要的部分。环境系统的太阳辐射能不仅为生命系统的生存与繁衍提供动力并发挥多种效应, 而且也推动着环境系统各要素的变化和发展。

本项工作得到中国科学院重中之重 06 项目和国家重点自然科学基金的资助, 张祝平、黄录基、曾小平、林永标和吕冬梅等同志曾提供帮助, 特此致谢!

1996-03-28 收稿; 1996-08-26 修回

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。下垫面的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,同时也是影响农林业生产力的重要因素^[1-3]。因此测定自然条件下的太阳辐射热量平衡特征,分析作为生态系统研究主要内容之一的植物群落的热量平衡对深入认识能量在森林生态系统结构和功能中的作用及生产实践具有重要意义。本文报道中国科学院鹤山丘陵综合试验站草坡的能量平衡研究的结果。

1 自然概况

中国科学院鹤山丘陵综合试验站位于广东中部,东经 112°53',北纬 22°40'。试验区为低丘地势,气候温暖、多雨,年平均气温 21.7℃,最热月均温 29.2℃,最冷月均温 12.6℃,年平均日照时数 1797.8 h,年平均太阳辐射量为 434.7 MJ m²。年平均降雨量为 1801.1 mm,但分布不均,有明显的干湿季。该区年蒸发量为 1638.8 mm。地带性土壤为赤红壤,有机质含量为 0.56-1.64%。地带性植被为亚热带季风常绿阔叶林。但因人为活动的影响,现状植被除部分地方为马尾松残林外,大面积为亚热带草坡^[4]。

通过同步进行的样地调查可知,该草坡以桃金娘、岗松和芒萁为优势种。目前有灌木 15 种,它们是桃金娘 (*Rhodomyrtus tomentosa*)、岗松 (*Baekkea frutescens*) (这两个种的重要值分别为 147.04 和 45.79)、梅叶冬青 (*Ilex asprella*)、米碎花 (*Eurya chinensis*)、鬼灯笼 (*Callicarpa fortunatum*)、春花 (*Rhaphiolepis idica*)、算盘子 (*Glochidion puberum*)、山菅兰 (*Dianella ensifolia*)、酸藤子 (*Embelia laeta*)、水杨梅 (*Adina pilulifera*)、山芝麻 (*Helicteres angustifolia*)、黄栀子 (*Gardenia jasminoides*)、黑面神 (*Breynia fruticosa*)、马尾松 (*Pinus massoniana*)、野牡丹 (*Melastoma candidum*) 等 (这后 13 个种的重要值均较小)。此外,还有芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*) (重要值为 168.61)、圆叶双唇蕨 (*Schizoloma heterophyllum*)、玉叶金花 (*Mussaenda pubescens*)、弓果黍 (*Cyrtococcum patens*)、纤毛鸭嘴草 (*Ischaemum aristatum*)、地稔 (*Melastoma dodecandrum*)、凤尾蕨 (*Pteris nervosa*) 和铺地蜈蚣 (*Lycopodium cernuum*) 等草本植物 8 种,冠层平均高度约为 85 cm,盖度为 80%。

2 研究理论和方法

2.1 研究理论依据

白天,森林吸收的热量为辐射平衡 R_n , 支出的热量中: 一部分用于森林与大气乱流热交换 (H) 上; 一部分用于森林蒸发散耗热 (LE) 上; 一部分用于林地土壤热交换 (G); 再一部分用于森林植物体内储热量 J_p 的变化; 还有小部分 (约为太阳总辐射的 1%) 用于森林光合作用耗热 μc 上。夜间正好相反。对于水平交换热而言,由于研究对象为集水区,能量交换很少,可忽略^[6,7]。由于草坡的能量平衡与森林林冠层相似。因此,草坡的热量平衡方程可简写为: $R_n = LE + H + G + J_p + \mu c$

由于森林光合作用耗热与太阳总辐射相比其值很小 (约为 1%), 植物体贮热量 J_p 的变化也不是主要项,本文暂不考虑。所以其平衡方程可写为: $R_n = LE + H + G$

此外,亦可用公式: $Q = Q_r + R_o + Q_e$ 计算,其中 Q 为总辐射, Q_r 为反射, R_o 为净辐射, Q_e 为有效辐射。

上式有关各分量计算方法如下:

(1)土壤热交换 G 的计算: 土壤热通量与辐射平衡相比, 大约只占 3-15%, 所以它不是热量平衡中的主要项, 但是它又直接影响到土壤温度的变化速度和变化时间。无植被比有植被土壤热通量低, 而不同植被的土壤热通量差值并不大。

采用依金公式计算^[2]: $G = C_m/t (s_1 - kt/10s_2)$; $C_m = C_{ps} Pr$; $C_{ps} = Mr/Mg(0.2 + C_w Q_r)$ 。式中: t 为时间间隔(min); C_m 为土壤容积热容量($4.18 \text{ J cm}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$); kt 为土壤的导热系数($\text{cm}^2 \text{ min}$); s_1 表示土壤各深度温度分布函数, 决定于时间间隔($^\circ\text{C cm}$); s_2 表示当时 10 cm 至 20 cm 深度的土壤温度变化特征函数($^\circ\text{C min}$); C_{ps} 为湿土的比热($4.18 \text{ J g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$); Pr 为土壤的容重(g cm^{-3}); Mr 为干土重(g); Mg 为湿土重(g); Q_r 为土壤的绝对含水量(%); C_w 为水的比热($4.18 \text{ J g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$)。

(2)波文比、森林总蒸发散及湍流热交换的计算: 地面与大气间的湍流热交换与热力和动力因素有关。因此, 林冠作用层与大气间湍流热交换(H)可写成:

$$H = -\rho C_p K_h \partial T/\partial Z + \rho C_p' K_m (T/g) \chi \partial V/\partial Z^2$$

式中: ρ 为空气密度; C_p 为空气定压比热; C_p' 为空气动能交换比热; K_h 为大气温度扩散系数; K_m 为动量的涡动扩散率; T 为大气温度; g 为重力加速度; $\partial T/\partial Z$ 为垂直温度梯度; $\partial V/\partial Z$ 为垂直风速梯度。

森林蒸发散可写成: $LE = -L_p K_e \partial q/\partial Z$

式中: L_p 为蒸发潜热; K_e 系水汽的扩散系数; $\partial q/\partial Z$ 为垂直湿度梯度。

$$\text{上述两式相比为: } B = \frac{H}{LE} = \frac{\rho C_p K_h \partial T/\partial Z - \rho C_p' K_m (T/g) \chi \partial V/\partial Z^2}{L_p K_e \partial q/\partial Z}$$

B 即为波文比, 是乱流(湍流)热通量与蒸发散耗热量之比。Bowen(1926)认为, 在土壤水分有保证时, 土壤热通量 G 只是 R_n 的一小部分, 于是他把 R_n 只分成潜热与感热两部分, 两者相比即为波文比。波文比取决于植物生长的密度和水的有效性。

湍流热交换主要受大气稳定度及风速的制约, 大气稳定度是浮力作用的结果, 随上、下层气温变异而变化, 但这种浮力作用可能受风流动的强烈反作用, 可以用无量级的里查逊参数 R_i 说明包括动力和热力因素的湍流强弱, 即 R_i 被用作近地面气流中不稳定性与稳定度的量度, $-R_i$ 是湍流边界层气流中一个与自由对流和强迫对流的相对重要性密切有关的量。

$$R_i = \frac{g}{T} \frac{\partial T/\partial Z}{(\partial V/\partial Z)^2}$$

当 $R_i > 0.005$ 时, 大气处于稳定状态, 温度层结为逆温分布, 湍流表现微弱, 此时, 波文比

$$\text{为: } B = \frac{T}{Lg} \frac{(\partial V/\partial Z)^2}{\partial q/\partial Z} \quad 0.005 < R_i < 0.21, \quad B = 0 \quad R_i < 0.21$$

当 $|R_i| \geq 0.005$ 时, 大气处于中性状态, 湍流主要取决于风速(S)。 L 为汽化潜热。此时的波文比为:

$$B = \frac{TC_p'}{SL} \frac{(\partial V/\partial Z)^2}{\partial q/\partial Z}$$

当 $R_i < -0.005$ 时, 大气处于不稳定状态, 湍流增强, 此时波文比为: $B = \frac{C_p}{L} \frac{\partial T/\partial Z}{\partial q/\partial Z}$

将以上波文比的绝对公式代入有关式子, 可得出草坡与大气间湍流交换公式和草坡总蒸发散

$$\text{公式: } H = \frac{R_n - G - J_p}{1 + |B|} \quad LE = \frac{R_n - G - J_p}{1 + |B|}$$

2.2 研究方法

辐射梯度的观测 辐射梯度的观测点选在永久样地附近, 坡向东南, 坡度 28° 。观测项目包括地上 1.5 m 处的太阳总辐射、散射辐射、反射辐射和直接辐射。测定仪器为美国产 LI-188B Integration Quantum Radiometer Photometer 及其附件和澳大利亚米特利顿公司的 CM-1 型净辐射表。

由于辐射仪器具有累积平均的功能, 为了消除林下光斑及阴影的不均带来的影响, 我们采用了移动探头的方式测定反射辐射^[9], 其余项目则采用固定探头。

小气候梯度的观测 草坡的小气候梯度的观测仪器全为国产常规气象仪器, 观测的项目为: 草地上 2.0、0.5 m 的温度、湿度, 冠表温度, 地面上 2.0、1.0、0.5 m 的风速, 土壤 0、5、10、15、20 cm 的温度。此外还测定了 0-40 cm 内土壤含水量及植物含水量(烘干法), 土壤容重(环刀法)。用美国索恩韦特公司 610 型土壤热流板 4 块埋于土中 5 cm 处测土壤贮热量(以此与计算值对照)。

研究时间 1989 年开展了部分能量平衡研究工作, 后期主要进行了月进程的研究, 本次观测时间 1993 年 12 月到 1994 年 11 月。辐射梯度、小气候梯度观测每天测定时间为 6:00、8:00、10:00、12:00、14:00、16:00 和 18:00, 时间控制由数据记录器完成; 土壤水分、土壤容重每月取样测定 1 次。

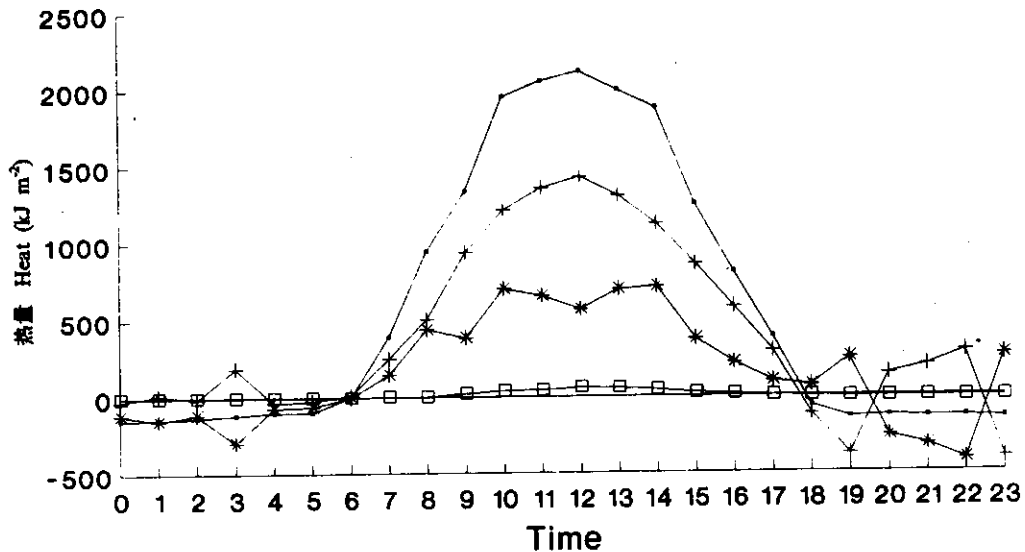


图 1 热量平衡各分量的日变化图(张少贤等 1989 年 8 月 30 日-9 月 3 日测定)

Fig. 1 Daily change of heat balance components (After Aug. 30-Sept. 3, 1989 Zhang Shaoxian et al.)

—●— 净辐射 Net radiation -x- 潜热通量 Latent heat flux
 -*- 显热通量 Sensible heat flux —■— 土壤热通量 Heat storage in soil

3 结果与分析

能量平衡是形成小气候的物理基础,也是影响生态系统生产力的重要因素。

3.1 能量平衡的日进程

通过 1989 年 8 月 30 日-9 月 3 日的测定,随时间的变化,大气分别呈现中性、稳定性和不稳定性状态,利用上述公式计算得出,在晴天,少云,能量平衡各分量的日变化基本上是一致的,中午达到最大值,上下午大体呈对称分布如图 1。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,表明草坡的水分条件尚好,但午后蒸发散耗热随净辐射的减少而下降,12:00-14:00 热量消耗于湍流热通量上有所增加,土壤热通量日变化十分平缓,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 6:00 和 18:00 左右。最大值出现在 12:00-13:00,最小值出现在 19:00 左右。

上述能量平衡的结果表明:地面的湿润条件对蒸发有很大的影响,当土壤中有足够的水含量时,蒸发散与蒸发散失热的大小基本上决定于辐射平衡的数值。地面的湿润条件基本上左右了湍流热通量数值大小的分布,地面愈湿润,湍流热通量就愈小;反之,地面愈干燥,湍流热通量就愈大。

3.2 能量平衡的月进程

从全年看,净辐射占了总辐射的 61.1%,而水分蒸发的热量消耗(潜热)是主要的能量支出项,占了净辐射的 74.7%。地面与大气间的湍流热通量又占了净辐射的 21.2%,土壤和植被贮热所占比重较小。其各分量的月进程如图 2 所示。

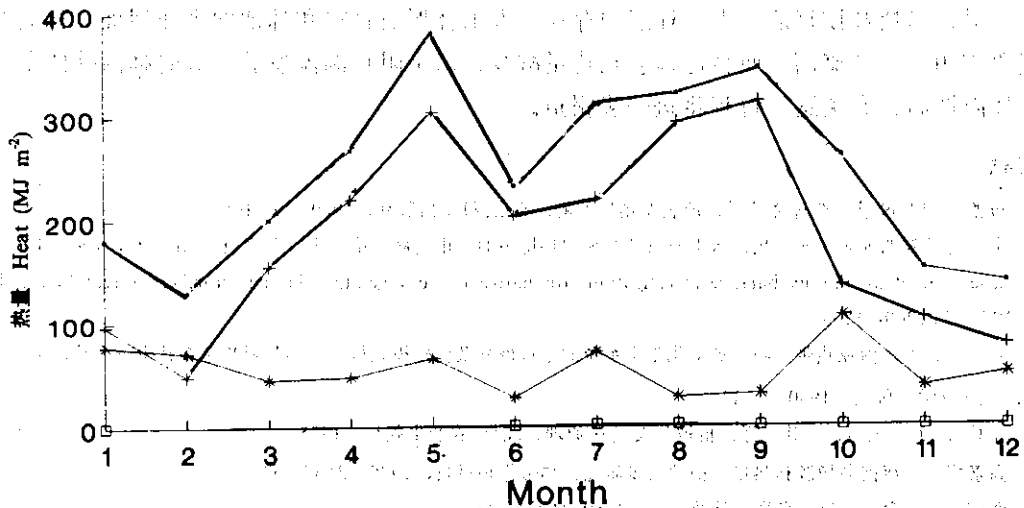


图 2 能量平衡各分量的季节变化图(1993 年 12 月-1994 年 11 月)
 Fig. 2 The changes of various items of heat balance (Dec. 1993-Nov. 1994)
 —●— 净辐射 Net radiation —×— 潜热通量 Latent heat flux
 —*— 显热通量 Sensible heat flux —□— 土壤热交换 Heat storage in soil

辐射平衡结果及分析见另文^[9]。蒸发散耗热以2月最少,仅占该月净辐射的37.5%,8、9月份最高,达该月净辐射的90%以上,水分较多的4-9月的蒸发散耗热明显高于其余各月份。

湍流热通量的月变化没有明显的规律,波动较大,其中10月份最大。从全年看,水分较少的10-1月湍流热通量占净辐射的比重较大,说明这期间净辐射绝大部分供给了湍流热通量,可见这个时期水分条件十分欠缺。

土壤热通量与其它分量相比,其比重要小得多,但它直接影响大气和土壤中能量的变化,其月趋势是夏季高于秋季,秋季高于冬季,尤以冬季最少。反映了冬季土壤异常干燥。其原因可能是在冬季,草坡植被枯萎,蒸腾作用减至最少,贴地气层水汽含量大为减少,土壤持水量也减少^[9]。

从图2可见,1、2月热量与水分之间的不相适应比较显著,2月的湍流热交换还超过了蒸发散失热,水分不足较为突出。10月秋高气爽时期热量与水分不相适应最为明显,湍流热通量达全年最高峰,这一时期更易于发生旱情。5月份辐射平衡达全年顶峰时,潜热通量也相应增加到仅次于9月的最大值。

通过太阳辐射能和热量平衡研究可知,太阳辐射透过大气层以后,仅有4775.2 MJ m²a⁻¹左右的辐射能到达草坡,草坡反射了822.5 MJ m²a⁻¹,其净辐射收入为2915.6 MJ m²a⁻¹,净辐射收入中又有2077.8 MJ m²a⁻¹用于蒸发散作用,618.1 MJ m²a⁻¹用于湍流热交换,87.5 MJ m²a⁻¹用于土壤热交换,植被贮热约38.8 MJ m²a⁻¹,用于净光合作用耗热93.4 MJ m²a⁻¹。

虽然鹤山年辐射量和降雨较多,但水热条件有几个月没有适宜配合,使得鹤山草坡的净辐射有90%以上用于地面以上植被和空气湍流交换所消耗,小气候条件欠佳,影响了这一生态系统的生产潜力的发挥,通过同期草坡生物量和生产力的研究可知,草坡年贮热约38.8 MJ m²a⁻¹,用于净光合作用耗热约93.4 MJ m²a⁻¹,而毗邻的针叶林、乡土林和豆科混交林的相应值均远高于草坡。可见,当植被恢复后,由于林冠的存在,人工林形成林冠和林地两个作用面,林冠又具有双重气象作用,一是遮荫,使林地辐射到达量减少,二是阻止湍流发展,减弱林内外能量交换强度,使林内增温。有关这一过程将进一步报道。

参考文献

- 1 布德科 M N 著,李怀瑾等译,地表面热量平衡.北京:科学出版社,1960,10-106
- 2 中国科学院地理研究所.热、水平衡及其在地理环境中的作用问题.第一辑.北京:科学出版社,1960,1-10
- 3 Aase J K et al. Energy balance investigations on native range vegetation in the Northern Great Plains. Ecology, 1972, 53:1200-1203
- 4 余作岳.广东南亚热带丘陵荒坡退化生态系统的植被恢复及优化模式探讨.热带亚热带森林生态系统研究,第七集.北京:科学出版社,1990,1-11
- 5 蒙特思 J L 主编,卢其光译.植被与大气-原理.北京:农业出版社,1985
- 6 高素华等.海南岛橡胶林热量平衡的初步研究.热带作物科技,1985,(3):57-63
- 7 贺庆棠等.森林的热量平衡.林业科学,1980,(1):24-33
- 8 Ashton P S et al. Light intensity measurements in rain forest near Santarem. Brazil. Ecol, 1957, 45:65-70
- 9 蔡锡安等.鹤山南亚热带草坡生态系统的辐射能环境.热带亚热带植物学报,1996,4(2):40-46