

## 小良试验站三种生态系统能量平衡的研究

周国逸 余作岳 彭少麟

(中国科学院华南植物研究所, 广州 510650)

**摘要** 1981年-1990年对混交林、桉树林、裸地三种生态系统进行了连续观测, 对其能量平衡问题进行了对比研究。结果表明对太阳辐射的反射率以混交林的最小, 桉树林次之, 裸地的最大; 裸地的净辐射值是桉树林和混交林第二作用层的1.57倍, 这反映出林冠对太阳辐射进入林内的阻碍; 混交林、桉树林和裸地的蒸散耗热分别占净辐射的95%, 59%和70%; 土壤导热率在不同的林分 and 不同的季节中有所变化, 但其变化的规律不明显; 土壤的热量通量在年内的平衡状况以裸地最好, 年内就已基本平衡, 混交林内的热量通量年内差额最大。整个混交林系统的热量平衡支出项主要为蒸散, 小气候以温暖湿润为基本特征, 桉树林和裸地的热量平衡支出项主要靠乱流交换, 常常以高温干旱的小气候为主。

**关键词** 生态系统; 能量平衡; 混交林; 桉树林; 裸地

**中图分类号** Q947.5

## A STUDY ON ENERGY BALANCE IN THREE ECOSYSTEMS AT XIAOLIANG EXPERIMENTAL STATION

Zhou Guoyi Yu Zuoyue Peng Shaolin

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

**Abstract** Based on consecutive measurement from 1981-1990 at Xiaoliang Experimental Station in Guangdong, the energy balance in three ecosystems, mixed forest, eucalyptus forest and bare land, was studied comparatively. The reflection rate to solar radiation was in the order bare land > eucalyptus forest > mixed forest. The net radiation (NR) on bare land was 1.57 times of that on mixed forest and eucalyptus forest. The energy dissipation by evapotranspiration was 95% of NR for mixed forest, 59% of NR for eucalyptus forest and 70% of NR for bare land. The heat conductivity of soil changed a little in different ecosystems and various seasons, but the regularity was not apparent. Annual heat flow through soil was nearly balanced for bare land, which differed from that for mixed forest and eucalyptus forest. As a whole, the heat environment was best in mixed forest and worst in eucalyptus forest, which was shown by that the output of energy from the mixed forest was mainly through evapotranspiration and that from the eucalyptus forest was mainly through air movement. This is why the micro-climate in mixed forest is warm and wet but that in eucalyptus forest is hot and dry.

**Key words** Ecosystem; Energy balance; Mixed forest; Eucalyptus forest; Bare land

中国科学院生物技术特别支持, 国家基金(39700112、39630240), 广东省基金(960468)资助项目  
1998-06-08 收稿; 1998-11-24 修回

能量是生态系统一切功能过程的原动力。林冠是森林生态系统的第一个作用层, 太阳辐射到达这里以后, 经过反射、吸收和透过作用后, 只有小部分到达林地; 接着, 林冠的蒸发、蒸腾、乱流交换等又把能量耗散到大气空间; 同时, 在这里还发生了能量被生产者同化作用固定的现象。总之, 森林生态系统的能量平衡过程大多发生在这里<sup>[1]</sup>。林冠以下到地表层次对于森林生态系统来说是第二个作用层, 但对于裸地却是第一个作用层。是生态系统能量的一个交换和贮存库。土壤、林冠从天空中吸收太阳辐射及大气逆辐射以后, 很大一部分用在土体的蒸发上<sup>[1]</sup>。小良试验站从1959年开始进行退化生态系统的人工恢复工作, 对比的试验地共有5个类型<sup>[2]</sup>。从1980年开始对其中3个对比类型进行小气候和能量平衡过程的系统观测, 本文是1980—1990年连续10年的观测研究结果。

## 1 试验地概况

试验地位于广东省电白县小良水土保持站内, 属海岸台地地貌, 地理位置为东经 $110^{\circ}54'18''$ , 北纬 $21^{\circ}27'49''$ , 属热带北缘地区, 受人为活动的影响, 原生植被已破坏殆尽, 水土流失有上百年历史, 年平均气温 $23^{\circ}\text{C}$ , 最高气温 $36.5^{\circ}\text{C}$ , 最低为 $4.7^{\circ}\text{C}$ , 月平均气温在 $18^{\circ}\text{C}$ 以上者达9个月, 1981—1990年间平均年降雨量 $1454.5\text{ mm}$ , 最大年降雨量 $2209.8\text{ mm}$  (1985年), 最小年降雨量 $1128.7\text{ mm}$  (1984年), 干湿季节分明, 干季(10—3月)雨量只有28.7%, 湿季(4—9月)占71.3%, 降雨方式多以为暴雨形式的对流雨及台风雨。地带性土壤为砖红壤。由于水土流失严重, 整个试验区的表土大部分已被蚀去, 很多小集水区的地表曾经光裸成板状, 被人称为光板地<sup>[2]</sup>。选择的3个小集水区生态系统的基本情况: 光裸地集水区就是原来的侵蚀地, 没有实行任何人工恢复的措施, 留作对照用, 它至今还是原来的样子, 土壤孔隙度小, 结构致密, 几乎没有非毛管孔隙; 桉树(*Eucalyptus exserta*)林小集水区是在与光裸地小集水区相同的侵蚀地上人工种植桉树纯林而来的, 这里的桉树林林相简单, 只有一个层次, 林下地被物稀少, 地表较裸地集水区更加板结, 很多地方的表土甚至光滑坚硬, 这实际上是人工恢复的第二个阶段, 也留下了一个集水区作为对照, 它就是本文所指的桉树林集水区; 混交林是在人工恢复第二阶段的基础上, 通过各种林分改造措施, 并结合自然演替进来的物种而构建起来的, 目前已经形成大面积的接近当地顶级群落的混交林, 本文所述的就是其中的一个集水区, 其林相结构极其复杂, 从地被物到冠层, 有多个层次, 林内郁闭, 林地土壤疏松。这3个集水区彼此相邻, 地形地貌条件基本一致, 最初都是严重退化的侵蚀地, 因此, 最初的土壤条件基本一样。有关这3个集水区的小气候状况见表1, 表中的雨量存在一定的差异, 笔者曾对此有过详细的报道<sup>[3]</sup>。

表1 3个小集水区的小气候简表  
Table 1 Microclimate factors at three catchments

集水区 Catchments	面积( $\text{hm}^2$ ) Area	气温( $^{\circ}\text{C}$ ) Temperature	相对湿度 RH(%)	年日照时数(h) Annual sunlight	雨量(mm) Annual rainfall	蒸发(mm) Annual evaporation
混交林 Mixed forest	6.41	22.8	87.3	2041.7	1494.4	729.6
桉树林 Eucalyptus forest	3.78	22.9	85.6	2041.7	1313.5	652.5
裸地 Bare land	3.73	22.9	82.8	2041.7	1533.7	1747.4

## 2 研究方法

### 2.1 辐射平衡的计算

第一作用层(混交林和桉树林是指林冠表面到林冠枝下高范围内的整个林冠层, 裸地则指离地表 1.5 m 到地表)辐射平衡(净辐射)方程为:

$$R_1 = Q(1 - \alpha_1) - \varepsilon_1 \quad (1)$$

式中  $R_1$  为第一作用层的辐射平衡 ( $J m^{-2}d^{-1}$ );  $Q$  为第一作用层的总辐射 ( $J m^{-2}d^{-1}$ );  $\alpha_1$  为第一作用层的反射率;  $\varepsilon_1$  为第一作用层的有效辐射 ( $J m^{-2}d^{-1}$ )。

第二作用层(混交林和桉树林是指离地表 1.5 m 到地表, 裸地则没有第二作用层)的辐射平衡方程为:

$$R_2 = Q(1 - \alpha_2) - \varepsilon_2 \quad (2)$$

类似地, 式中  $R_2$  为第二作用层的辐射平衡 ( $J m^{-2}d^{-1}$ );  $Q$  为到达第二作用层的总辐射 ( $J m^{-2}d^{-1}$ );  $\alpha_2$  为第二作用层的反射率;  $\varepsilon_2$  为第二作用层的有效辐射 ( $J m^{-2}d^{-1}$ )。

根据 M. E. 别而良德公式<sup>[1]</sup>, 可按如下方法计算辐射平衡值 ( $J m^{-2}d^{-1}$ ):

$$R_0 = (1 - \alpha) R_a (0.20 + 0.64 \frac{n}{N}) - \varepsilon T^4 (0.56 - 0.092 \sqrt{e_d}) (0.10 + 0.90 \frac{n}{N}) \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为作用面的反射率;  $R_a$  为假定在无大气的条件下最大可能辐射量 ( $J m^{-2}d^{-1}$ );  $\frac{n}{N}$  为日照率, 用小数表示;  $\varepsilon$  为司蒂芬-玻而兹曼常数, 取值  $5.5668 \times 10^{-8} (W m^{-2}K^{-4})$ ;  $T$  为林冠上或离地表 2 m 高度处的绝对温标 (K);  $e_d$  为离地表 2 m 高度处的实际水汽压 (mmHg)。其中:

$$R_a = 4.584 \times 10^6 \frac{S^*}{\rho^2} (\omega_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \delta \cos \varphi \sin \omega_0) \quad (4)$$

式中  $S^*$  为太阳常数, 取值  $8.151 (J cm^{-2}min^{-1})$ ;  $\pm \omega_0$  为中午到日落或日出的时角大小(弧度);  $\varphi$  为当地的地理纬度(度);  $\delta$  为太阳赤纬(度), 可以在天文年历中查得;  $\rho$  为以日地平均距离的分数所表示的日地距离, 约等于  $1^{[4,5]}$ 。

### 2.2 热量平衡的计算

3 个集水区生态系统热量平衡都可以用如下的方程表示:

$$R_0 = LE + V_0 + P_0 \quad (5)$$

式中  $R_0$  为作用面的净辐射,  $LE$  为系统的总蒸散耗热,  $V_0$  为系统的湍流热交换,  $P_0$  为系统中土壤热交换值。它们的单位与前面一样, 都为净辐射的单位。

还有少量(一般小于 4%)的热用于系统贮热量的变化及光合作用, 本文在此忽略不计。

系统的蒸散耗热(也称为潜热)按下式计算<sup>[5]</sup>:

$$LE = LE_0 \left\{ 1 + \frac{r}{E_0} - \left[ 1 + \left( \frac{r}{E_0} \right)^{\frac{NP}{P^2 - P - 1} + N + 1} \right]^{\frac{1}{\frac{NP}{P^2 - P - 1} + N + 1}} \right\} \quad (N \geq 0) \quad (6)$$

式中  $E_0$  为蒸散潜力 (mm), 即最大可能蒸散, 是热量条件的量度;  $L$  为水的气化热 ( $J g^{-1}$ );  $r$  为系统的贮水量 (mm);  $P$  为大气相对湿度, 以小数表示;  $N$  为系统的保水参数, 无量纲, 本文中的桉树林为 11.7, 裸地为 9.8, 桉树林为 4.2。在应用时, 必须注意  $L$  与  $E_0$  的单位统一。

为了计算土壤的热交换量, 首先计算土壤的导热系数  $\lambda$ , 土壤的容积热容量  $C_m$  等。土壤的比热  $C_p$  ( $J g^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) 可以分解为:

$$C_p = C_1 M_1 + C_2 M_2 + \dots + C_n M_n \quad (7)$$

式中  $C_1, C_2, \dots, C_n$  为组成某一土壤的各组分的比热 ( $J g^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $M_1, M_2, \dots, M_n$  为土壤各组分的密度 ( $g \text{ cm}^{-3}$ )。

土壤的容积热容量  $C_m$  ( $J \text{ cm}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) 也可以分解为:

$$C_m = V_1 C_w + V_2 C_s + V_3 C_g \quad (8)$$

式中  $V_1, V_2, V_3$  分别表示水、土壤和空气的体积 ( $\text{cm}^3$ );  $C_w, C_s, C_g$  分别表示水、土壤和空气的容积热容量 ( $J \text{ cm}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )。

土壤包含矿物质和有机质, 两者的容积热容量分别为 0.46 和 0.60, 而实际上, 方程 (8) 中的空气组分是微不足道的, 故上式可能简化为:

$$C_m = 0.45 X_m + 0.66 X_o + X_w \quad (9)$$

式中  $X_m, X_o, X_w$  分别是矿物质、有机质和水的体积。

在土壤中, 某一点的温度变化  $\frac{d\theta}{dt}$  服从如下微分方程:  $\frac{d\theta}{dt} = \frac{\lambda d^2\theta}{C_m dx^2}$ 。这是根据容积热容量  $C_m$ , 温度梯度变化率  $\frac{d^2\theta}{dx^2}$  以及某已知点上随时间而变的温度变化  $\frac{d\theta}{dt}$  计算导热率  $\lambda$  的基本方程, 由于存在热散发, 因此按此方程算出的导热率  $\lambda$  实际上是“表观”导热率, 一般说来, 它比实际导热率要小一些<sup>[4]</sup>。

求出了导热率, 可以根据  $dQ = -\lambda \frac{dT}{dz} ds dt$  求出土壤各点的热交换值。

有关湍流热交换值, 这里根据湍流系数加以计算。

### 3 结果与分析

#### 3.1 热量输入

**研究地太阳总辐射概述** 投射过来的太阳辐射一部分被作用面反射掉, 混交林、桉树林和裸地的反射率分别为 23.9%、24.5% 和 25.5%; 对有林地来说, 一部分透射到林地, 混交林和桉树林林冠透过率分别为 10.0% 和 45.6%; 还有一部分被林冠吸收, 混交林和桉树林林冠吸收率分别为 66.1% 和 29.9%。这些结果是一天中 8、10、12、14、16 时测定的平均值。从中可以看到, 第一作用层对太阳辐射的反射率有一定的差异, 但不大, 这主要与这一层次的颜色相关。裸地表层由于长期的冲刷而积累了一层粗砂, 在阳光下有较强的反射作用; 桉树林林相整齐, 叶面颜色较浅, 对太阳辐射的反射率高于林相不整齐, 颜色较深的混交林。混交林林冠郁闭、层次多样, 桉树林林冠相对开敞, 层次单一, 使得桉树林林冠透过率是混交林的 4.56 倍,

而前者的吸收率只有后者的 0.45 倍。

**净辐射值** 3 个系统彼此相邻, 进入各系统界面的净辐射值假定是一致的, 这里主要讨论森林的第二作用层与裸地净辐射的对比关系。1981-1990 年平均净辐射值见表 2, 它表明裸地的年平均净辐射值比混交林和桉树林的第二作用层的大 0.57 倍, 平均为  $4.11 \times 10^9 \text{ J m}^{-2}$ , 这说明裸地的热量条件极为丰富, 但必须注意的是这丰富的热量条件却也容易造成严酷的生境。混交林和桉树林第二作用层有相似的净辐射量, 平均年辐射量分别为  $2.59 \times 10^9 \text{ J m}^{-2}$  和  $2.60 \times 10^9 \text{ J m}^{-2}$ , 此值比北纬  $26^\circ 50'$  的杉木人工林的年净辐射值略大<sup>[4]</sup>。3 个系统年内净辐射的月变化进程一致, 最大值出现在 7 月份, 最小值在 2 月份, 而与太阳高度角的年内变化不尽一致, 这与当地的小气候条件有关。混交林的净辐射日变化情况见图 1, 晴天最大值出现在 13 时, 由于林冠的遮蔽, 夜间净辐射值变化平缓, 没有明显的极小值, 这是有林地一个普遍特性。

表 2 三个系统的净辐射值 ( $10^4 \text{ J m}^{-2}$ ) (1981-1990 年的平均值)

Table 2 Net radiation ( $10^4 \text{ J m}^{-2}$ ) in the three ecosystems (Annual mean of 1981 to 1990)

月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
混交林 Mixed forest	12016	9727	12880	17355	26729	30455	35898	31401	28366	23015	17066	13698
桉树林 Eucalyptus forest	12038	9641	12821	17380	26568	30277	35777	31453	28497	23012	17429	13779
裸地 Bare land	24528	18491	23417	26625	39503	44039	51512	45279	42212	36399	30707	28097

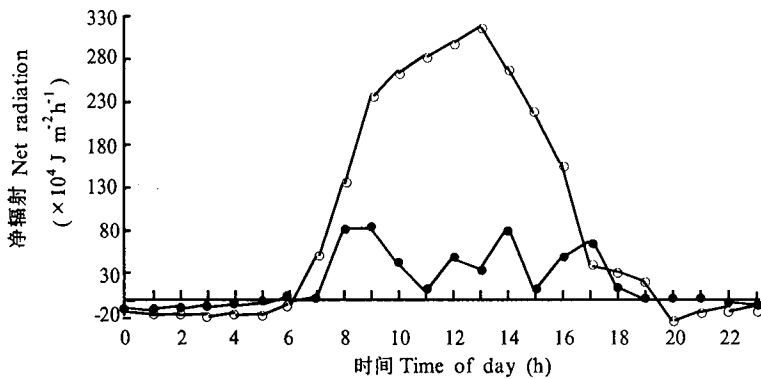


图 1 混交林净辐射的日变化

Fig. 1 Diurnal changes in net radiation in mixed forest

—○— 晴天 Sunny day; —●— 云天 Cloudy day

### 3.2 热量支出

#### 3.2.1 蒸散耗热

蒸散耗热是系统热量支出的主要项目<sup>[4-7]</sup>, 根据连续 10 年的测定, 混交林、桉树林和裸地的蒸散耗热分别占净辐射的 95%、59% 和 70%。蒸散中又以林冠的蒸腾作用占优势<sup>[8]</sup>, 这是林冠作用层活性的表现。混交林蒸散耗热很大, 这与本系统内林分旺盛的生长, 集水区径流量小, 土壤贮水量相对较大等条件有关, 大量的热量用于蒸散, 使得混交林中的各种树木生活在湿润、温和、偏荫性的环境之中。可以说在混交林中, 决定蒸散大小的主要因子在于热量的多

少。桉树林林地具有 53.4% 的地表径流，用于蒸散的水分很少，其蒸散耗热自然较少，大量的热量消耗在系统内的湍流热交换和土壤的热扩散上，因此，试验地的桉树林生境有干燥、小气候变化剧烈和阳性的特征。在这里，决定蒸散大小的主要因子是水分的供应。相对于桉树林，裸地蒸散耗热较多，这是由于裸地地表径流相对较小，系统水分贮存量较桉树林大，可用于蒸散的水分较多所致<sup>[3]</sup>。对于裸地来说，蒸散耗热量的多少还是决定于能用于蒸散的水量。

表 3 三个生态系统的蒸散耗热值 ( $10^4 \text{ J m}^{-2}$ ) (1981-1990 年的平均值)

Table 3 Energy dissipation by evapotranspiration ( $10^4 \text{ J m}^{-2}$ ) in the three ecosystems (Annual mean of 1981 to 1990)

月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
混交林 Mixed forest	11930	9616	12715	17120	26620	30319	35720	31240	28297	22995	17066	13688
桉树林 Eucalyptus forest	3430	4472	6751	9349	15641	19190	21215	18740	18703	15535	11107	7596
裸地 Bare land	8347	8021	15765	17582	32952	37483	39160	35777	35246	29438	16360	11562

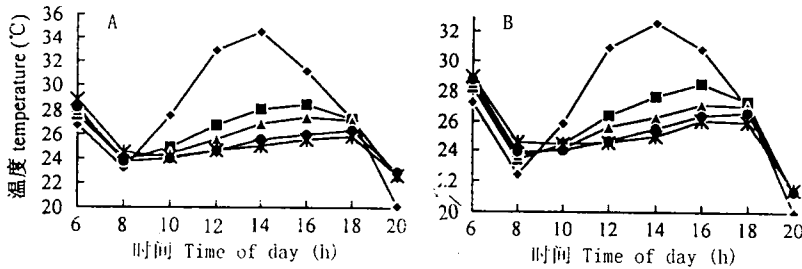


图 2 两种林分的土壤各层次温度日变化

Fig. 2 Diurnal changes in soil temperature at various soil layers under the two forests

A: 混交林 Mixed forest; B: 桉树林 Eucalyptus forest;

—◆— 0 cm; —■— 5 cm; —▲— 10 cm; —●— 15 cm; —\*— 20 cm

### 3.2.2 系统中的土壤热交换量

**土壤各层次的温度梯度** 混交林和桉树林土壤各层次温度日变化见图 2。它们的变化趋势是一致的，在 8-18 时之间，随着气温的上升，不同土壤层次之间的土温差异增大，在 14 时达到最大值；在 18-8 时之间，不同层次之间的土温差异很小。白天，混交林较桉树林的地表温度高，其原因不甚明了，但其它层次的温度相近；5-20 cm 土层的温度日变化上，混交林的比较有规律一些，这反映了其土壤相对均匀；15 cm 和 20 cm 两个层次的土壤日变化上，混交林相对不明显，这与混交林土壤水分含量较高有关。

**土壤的导热率** 从表 4 可见，在 0-20 cm 的 5 个土壤层次中，混交林的导热率总体上都比较小，并且变化不明显，基本上维持在同一个水平上，20 cm 以下，略有增加，这可能与这个系统的土壤得到改良，表层积蓄了大量有机质有关<sup>[2]</sup>；桉树林地和裸地的导热率相对较大，随着土壤深度的增加，土壤导热率明显地增大，到 20 cm 层次，已经增大了将近一倍，反映出两个系统的土壤板结的现实<sup>[2]</sup>。影响土壤导热率的因素很多，主要有土壤含水量和土壤容重，因为这两者基

本上决定了土壤比热和土壤容积热容量。间接的因素还有: 林地条件下, 土壤微生物及树木根系活动的季节性变化将影响着土壤中各种有机物及矿物质组成等, 这些都对土壤导热率起作用。

表 4 不同土壤层次的导热率 ( $J m^{-1} s^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ) (1981-1990 年的平均值)

Table 4 Heat conductivity ( $J m^{-1} s^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ) at various soil layers under three ecosystems (Annual mean of 1981 to 1990)

土层深度 Soil layer	0 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
混交林 Mixed forest	0.12	0.18	0.14	0.14	0.18
桉树林 Eucalyptus forest	0.16	0.17	0.21	0.25	0.46
裸地 Bare land	0.17	0.18	0.19	0.28	0.45

**土壤剖面中不同层次热流密度的日变化** 土壤的热交换决定着土壤的热力状况, 土壤白天是热汇, 夜间是热源, 土壤热通量决定于所获得的太阳辐射、土壤中温度梯度和土壤导热率。温度梯度越大, 则土壤热交换量越大。土壤中热量在 dt 时间内沿温度梯度流过曲面 ds 的热量 dQ 为:

$$dQ = -\lambda \frac{dT}{dz} ds dt \tag{10}$$

式中, Q 为热量 (J);  $\lambda$  为导热率 ( $J m^{-1} s^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ); T 为温度 ( $^\circ C$ ); z 为沿温度梯度方向的距离 (m), 负号表示热量传递方向与温度梯度的方向相反, 在 dt 时间内, 曲面 ds 的热量通量  $\Phi$  是:

$$\Phi = \frac{dQ}{ds dt} = -\lambda \frac{dT}{dz} \tag{11}$$

当 ds 为单位面积时,  $\Phi$  称为热流密度。

从图 3 可见, 两种林地 0-15 cm 土层的热流密度日变化基本上仍然呈单峰曲线。地表层的热流密度在 8-18 时为正, 其它时间呈负值, 随着土壤层次的加深, 相位逐渐后移。比较两种系统不同层次土壤的热流密度日变化曲线, 发现混交林地土壤在相位上较桉树林地土壤相位延滞, 土层越深, 延滞越明显。这个现象与土壤的导热率有关。

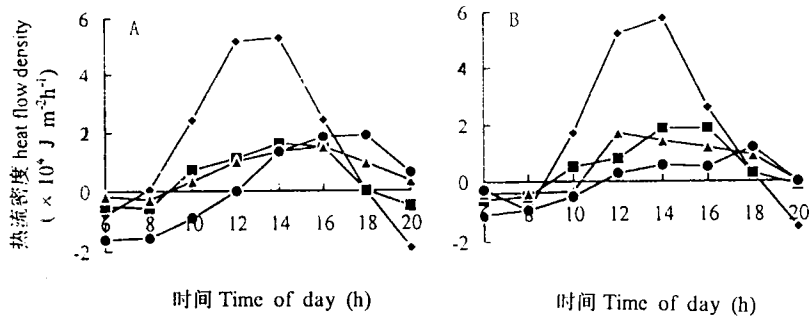


图 3 土壤各层次热流密度的日变化

Fig. 3 Diurnal changes in heat flow density at various soil layers under forests

A: 混交林 Mixed forest; B: 桉树林 Eucalyptus forest;

—●— 0 cm; —■— 5 cm; —▲— 10 cm; —◆— 15 cm

**土壤子系统的热交换量** 根据式 (10) 计算得到单位面积不同年份各月的热量平衡值 (表 5)。4-9 月份, 3 个系统的土壤都处于热汇阶段, 土壤吸收环境中的热量; 10-2 月份, 3 个系统与周围环境相比都处于热源阶段, 土壤释放热量到周围的环境中; 3 月份的情况较为特殊, 对于混交林来说, 其土壤是热源; 但桉树林和裸地都已经处于热汇状态。

表5 三个系统的土壤热平衡 ( $10^4 \text{ J m}^{-2}$ ) (1981-1990年的平均值)Table 5 Heat balance ( $10^4 \text{ J m}^{-2}$ ) in soils under three ecosystems (Annual mean of 1981 to 1990)

月份Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\Sigma$
混交林 Mixed forest	-886	-546	-457	1199	934	2487	1295	517	50	-582	-1415	-1799	798
桉树林 Eucalyptus forest	-820	-565	134	995	1337	1527	1672	649	324	-1018	-986	-1761	124
裸地 Bare land	-554	-330	387	918	1484	3232	2406	1199	843	-441	-1021	-870	617

### 3.2.3 湍流热交换值

湍流热交换值也称为显热通量。王政权<sup>[9]</sup>根据热量的湍流扩散系数表达式,并假定热量通量在近地层不随高度变化,进行积分后得到其积分式,在此基础上根据 A. C. Мони́н 和 A. M. Обухов 的相似理论,利用 A. Paulson 和 F. I. Badgley 提出的通用函数,设计了一种查算上述积分湍流系数的图解,同时给出了计算式为:

$$H = 1295.955\varphi_{1,2}(\theta_1 - \theta_2) \quad (12)$$

H 为显热通量 ( $\text{J m}^{-2}\text{s}^{-1}$ );  $\theta$  为 z 处的位温;  $\varphi_{1,2} = \begin{cases} \varphi_1 & z/L \geq 0 \\ \varphi_2 & 0 \geq z/L \geq -2 \end{cases}$   $\varphi$  为在廓线图上直接确定的

积分湍流系数; L 为湍流混合的铅直尺度。应用时,利用风速与温度梯度观测资料,在廓线图上直接确定  $\varphi$ ,再由 (12) 式计算出热量的湍流铅直输送量,其结果见表 6。

表6 三个系统的显热通量 ( $10^4 \text{ J m}^{-2}$ ) (1981-1990年的平均值)Table 6 Direct heat transfer ( $10^4 \text{ J m}^{-2}$ ) through air movement in three ecosystems

月份Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
混交林 Mixed forest	952	687	-302	-787	-867	-2306	-1058	-375	140	632	1339	1802
桉树林 Eucalyptus forest	9375	5539	5797	7089	8566	9563	13065	12062	9490	8515	7339	7934
裸地 Bare land	16739	10800	7293	8125	5068	3259	9946	8235	6123	7402	15368	17405

森林表层的显热主要受大气稳定性和风速的制约,而林内的显热由于林内的逆温现象而主要受热力作用的影响,林内风速小,因而与林冠相比林内的湍流热交换值是比较小的。林冠的特点是形成林内显热变化规律的基础,从表 6 可见,结构简单,冠层单一的桉树林较结构复杂拥有多个冠层的混交林,其显热通量是完全不同的,桉树林林冠枝下高比较大,林内的环境相对比较开敞,因此,林地—即第二作用层很活跃,桉树林内的显热通量多年的观测值均为正值,说明湍流热交换的结果是失去热量,从其量值大小来看,这个过程还是系统热平衡中热量的主要支出项。除 4 月份以外,它在湿季(4-9月)的值比裸地的还要大。桉树林生态系统水分亏缺,系统的蒸散作用小,大量的热量只能通过空气的乱流交换带走,这又反过来加强了系统的水分紧张状况。解决这个问题的关键在于增加林冠的郁闭度,促进林冠结构的复杂化、多元化,从而起到保持土壤涵养水源的作用,依次改善系统的热量状况。

### 参考文献

- 1 贺庆棠. 森林的热量平衡. 林业科学, 1980, 16(1):13-24
- 2 余作岳, 皮永丰. 广东热带沿海侵蚀地的植被恢复途径及其效应. 热带亚热带森林生态系统研究, 第3集. 海口: 海南人民出版社, 1985, 97-108



- 3 周国逸, 彭少麟, 余作岳. 退化生态系统恢复中水热限制因子作用—广东沿海台地水热条件的生态后果. 中国科协第二届青年学术会议论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1995, 596-601
- 4 周国逸, 康文星. 杉木人工林能量平衡的研究. 东北林业大学学报, 1990, 18(1):14-22
- 5 周国逸, 潘维涛. 森林生态系统蒸发散计算方法的研究. 中南林学院学报, 1988, 8(1):22-27
- 6 李国琛. 土壤热流量对运用热量平衡法测定林冠蒸散的影响. 热带亚热带森林生态系统研究, 第3集. 海口: 海南人民出版社, 1985, 116-126
- 7 徐德应, 曾庆波. 用能量平衡-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. 海口: 海南人民出版社, 1985, 183-195
- 8 黄录基, 李国琛, 张绍贤等. 热带人工混交林蒸散测定的初步分析. 热带亚热带森林生态系统研究, 第3集. 海口: 海南人民出版社, 1985, 109-115
- 9 王政权. 林带背风面湍流结构特征及对作物生理生态影响. 东北林业大学博士研究生学位论文, 1989