

1798(3)

16-24

第12卷 第1期

生态学报

Vol.12, No.1

1992年3月

ACTA ECOLOGICA SINICA

Mar., 1992

油松林的能量平衡*

肖文发

(中国林业科学研究院林业研究所, 北京)

S791.254

摘 要

根据实测资料, 本文利用梯度观测方法, 以波文比——能量平衡方程为基础, 对黄土残塬区(山西吉县)一片油松人工林的能量平衡规律和蒸散量进行了分析和研究。结果表明, 晴天油松林热量和净辐射收入丰富。蒸散耗热和湍流热交换占净辐射收入的86.2%, 平均波文比为0.5500, 土壤热通量约占净辐射收入的13.4%。晴天油松林蒸散水量8月份平均约5.1mm/d, 4月、5月份平均约3.4mm/d, 10月份平均约2.3mm/d, 明显大于空旷地, 呈秋季小于春季, 春季又小于夏季的趋势。

关键词: 油松, 能量平衡。

前 言

森林的能量平衡是森林气候形成的物理基础, 也是决定和影响森林生产力的重要因素。关于森林气候的形成及森林中能量和水分及其再分配规律的研究, 国内外都有不少报道, 但对于偏远、地形复杂的黄土地区人工林小气候, 特别是作为小气候形成基础的能量平衡方面的研究则很少报道。1988年开始, 作者等从能量平衡等角度出发, 在晋西黄土地区人工林植被系统进行了这方面的研究, 以期获得森林蒸散、水热平衡及热资源开发等研究获得规律性和代表性的资料, 同时, 探讨人工林的水土保持气候效益。

一、样地条件与研究方法

1. 样地基本状况

研究地为山西吉县红旗林场(110°27'—117°7'E, 35°53'—36°21'N), 吕梁山南端的黄土残塬沟壑区。属温带大陆性气候。冬季寒冷干燥, 夏季温度较高, 雨量集中, 但水热失调, 年平均温度10℃, 多年极端最高38.1℃, 极端最低-20.4℃, 日平均气温≥10℃积温3358℃, 全年无霜期170天左右, 多年平均降水579.1mm, 主要集中于6—9月, 占全年的69.5%, 年蒸发量大于年降水。

观测区土壤为黄土母质上发育的褐土, 土质均一, 土壤紧实, 表层容重1.1—1.3g/cm³ 土壤养分缺乏, 全氮量一般低于0.1%。

研究样地设置在一个小流域的两块面积均大于2000m²的平坦残塬面上, 海拔1300m, 坡度0—5°, 天然灌木虎榛子林(面积约500m²)和刺槐林与油松林相距约500m, 基本地理条件一致。另外在油松林附近选择一块面积为150m²的空旷地作为对照样地。样地基本特征见表1。

* 本文在北京林业大学贺庆棠教授指导下完成。

本文于1990年12月28日收到。

表 1 样地概况
Table 1 The general situation in sample plots

项目 Items 样地 Sites	年龄 Age (年)	平均 高度 Average height (m)	平均 直径 Average diam- eter (cm)	密 度 Density (n/ha)	郁 闭 度 Crown density	平 均 冠 幅 Mean crowding (m)	平 均 枝 高 Average branch height (M)	林 木 长 势 Growth	林 下 草 木 生 长 of underherb Growth	枯 枝 落 叶 Litter	土 壤 容 重 (%) weight soil unit	总 孔 隙 度 (%) Total porosity	毛 管 孔 隙 度 (%) Capillary porosity
油 松 林 <i>Pinus Tabulaeformis</i> Carr. Stand	15	3.5	4.4	5238	0.84	1.7	0.8	一般	差	丰厚	1.16	64.3	49.5
刺 槐 林 <i>Robinia pseudoaca-</i> <i>cia</i> L. Stand	21	11.6	9.4	1500	0.65	2.3	4.2	一般	较好	薄	1.07	47.5	42.3
虎 榛 子 林 <i>Ostryopsis davidia-</i> <i>na</i> Decne Stand	4	1.1	0.75*	570000	100%**	—	—	较好	—	丰厚	—	—	—

* 指地径; ** 指密度。

2. 研究方法

(1) 野外观测方法 野外观测于1988年4—10月进行, 观测仪器全部为国产常规气象仪器, 在观测开始及观测过程中定期(每两个月)进行标定, 每次观测时间间隔为1小时。野外观测项目及高度见表2。

(2) 油松林净辐射方程及其计算^[1-2] 油松林作用层(从林冠至林地土壤上层)的净辐射方程为:

$$R_0 = Q_0(1 - \alpha_0) - \epsilon_0 \quad (1)$$

式中: Q_0 ——林冠上的总辐射, α_0 ——油松林反射率, ϵ_0 ——油松林的有效辐射。

同理, 林地作用层(包括林地土壤上层)的净辐射为:

$$R_1 = Q'(1 - \alpha_1) - \epsilon_1 \quad (2)$$

式中, Q' 为到达林地的总辐射, α_1 为林地反射率, ϵ_1 为林地有效辐射。

在(1)、(2)两式中, Q_0 , Q' 及 α_0 , α_1 为实测值, 有效辐射 ϵ_0 及 ϵ_1 采用M.E别尔良德公式计算:

$$\epsilon = \delta \sigma T^4 (0.39 - 0.058 \sqrt{e})(1 - cn^2) + 4\delta \sigma T^3 (T_s - T) \quad (3)$$

式中: T , e 为林冠或林地作用层上2.0m高度的温度(K)和水汽压(hPa), n 为云量, C 为云量订正系数, 表示云层对有效辐射的影响, 取0.59; δ 为灰体系数, 植被一般取0.9—0.95, 干燥的土壤约0.92, 湿润的土壤取0.95, 这里取0.95, σ 为Stefan-Baltzman常数, 等于 $5.668 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$, T_s 为油松林冠作用面或地表作用面的温度(K)。

(3) 油松林能量平衡方程及其计算^[1,3] 根据能量守恒原理, 森林净吸收或净支出的热量即森林的辐射平衡, 一定等于其支出或收入的热量, 这就是森林的热量平衡或能量平衡。油松林的能量平衡方程可表示为

$$R_0 = LE_0 + V_0 + M_0 + 1A_0 + P_0 \quad (4)$$

式中: R_0 ——油松林净辐射; LE_0 ——油松林总蒸散(包括林冠蒸腾和林地蒸发); V_0 ——油松林的湍流热交换; M_0 ——油松林地土壤热交换; P_0 ——油松林冠储热量; $1A_0$ ——同化单位重量 CO_2 的耗热量, 约10467J/g; A_0 ——同化 CO_2 的量, 其中 $1A_0 + P_0$ 之和小于

表 2 野外观测项目及高度

Table 2 The items and heights of the measuring in the fields

样地 Sites	项目 Items	高 度 Height	观 测 项 目 Items measured				
油 松 林 <i>Pinus Tabulae- formis</i> Carr. Stand		作用层上2.0m Above action layer 2.0m	太阳总辐射 Total solar radiation	反射辐射 Radiation reflected	气温, Air temperature	湿度, Humidity	风速 Wind velocity
		作用层上0.5m Above action layer 0.5m	气 温 Air temperature	湿 度 Humidity	风 速 Wind velocity		
		离地2.0m Above the ground 2.0m	气 温 Air temperature	湿 度 Humidity	风 速 Wind velocity		
		离地0.5m Above the ground 0.5m	太阳总辐射 Total solar radiation	反射辐射 Radiation reflected	气温 Air temperature	湿度 Humidity	风速 Wind velocity
		地面0.0m, 土中5、10、15、20cm Ground, Under the ground 5, 10, 15, 20cm	地 温 Soil temperature	土壤容重 Soil unit weight	土壤湿度 Soil moisture		
刺 槐 林 <i>Robinia pseu- doacacia</i> L. Stand		作用层上2.0m Above action layer 2.0m	太阳总辐射 Total solar radiation	反射辐射 Radiation reflected	气温 Air temperature	湿度 Humidity	
		作用层上0.5m Above action layer 0.5m	气 温 Air temperature	湿 度 Humidity	风 速 Wind velocity		
		离地2.0m Above the ground 2.0m	气 温 Air temperature	湿 度 Humidity	风 速 Wind velocity		
		离地0.5m Above the ground 0.5m	气 温 Air temperature	湿 度 Humidity	风 速 Wind velocity		
		地面0.0m, 土中5、10、15、20cm Ground, Under the ground 5, 10, 15, 20cm	地 温 Soil temperature	土壤容重 Soil unit weight	土壤湿度 Soil moisture		
空 旷 地 Empty site		离地2.0m Above the ground 2.0m	太阳总辐射 Total solar radiation	反射辐射 Radiation reflected	气温 Air temperature	湿度 Humidity	风速 Wind velocity
		离地0.5m Above the ground 0.5m	气 温 Air temperature	湿 度 Humidity	风 速 Wind velocity		
		地面0.0m, 土中5、10、15、20cm Ground, Under the ground 5, 10, 15, 20cm	地 温 Soil temperature	土 壤 湿 度 Soil moisture			

5%, 忽略不计于是 (4) 式变为:

$$R_0 = LE_0 + V_0 + M_0 \quad (5)$$

(4) 式也同样适合于刺槐林, 灌木林。

油松林的潜热通量(LE_0)和显热通量(V_0)用波文比-能量平衡(BREB)方法计算, 波文比 β 的定义为:

$$\beta = V_0 / LE_0 \quad (6)$$

假设乱流扩散系数与水汽扩散系数相等的条件下, 考虑海拔高度的影响, β 计算式为:

$$\beta = 0.64 \cdot \frac{\Delta T}{\Delta e} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (7)$$

式中: ΔT ——林冠作用层上0.5米—2.0米气温差;

Δe ——林冠作用层上0.5米—2.0米水汽压差;

p ——测点气压; p_0 ——标准大气压。

由 (7)、(6)、(5) 式可联立求解得

$$V_o = \frac{R_o - M_o}{1 + 1.56 \cdot \frac{\Delta e}{\Delta T} \cdot \frac{p_o}{p}} \quad (8)$$

$$LE_o = \frac{R_o - M_o}{1 + 0.64 \cdot \frac{\Delta T}{\Delta e} \cdot \frac{p}{p_o}} \quad (9)$$

即分别为潜热(LE_o)和显热(V_o)的计算式。

土壤热通量采用修正的 Π, Π_e 拉伊哈特曼方法计算^[1.6]。

土壤导热率(λ) = 土壤容积热容量(C_n)与土壤导温率(a)的乘积即 $\lambda = C_n \cdot a$, a 值采用 T. X 采金公式求算。

$$a = \frac{H^2 M(\Delta)}{2 \Delta N(\Delta)} \quad (\text{cm}^2/\text{h}) \quad (10)$$

这里: H 取 20cm, Δ 为计算时段长度, 取 12h。

$$\begin{aligned} M_o = \frac{1}{H - H_o} & \left\{ \int_{H_o}^H C_n(z) \cdot [T(z, t_2) - T(z, t_1)] \cdot (H - z) \cdot dz \right. \\ & + \int_1^{H_o} C_n(z) \cdot [T(z, t_2) - T(z, t_1)] \cdot (H - H_o) \cdot dz \\ & - K \int_{t_1}^{t_2} [C_n(H) \cdot T(H, t) - C_n(H_o) \cdot T(H_o, t)] \cdot dt \\ & \left. + a \cdot K \cdot \int_{t_1}^{t_2} \int_{H_o}^H T(z, t) \cdot dz \cdot dt \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

($t_2 - t_1 = 1\text{h}$, $H_o = 10\text{cm}$, $H = 20\text{cm}$) 采用梯形积分即为土壤热通量的计算式。这里, 假定 $C_n(z) = az + b$, 积分下限 1cm 而不是 0cm, 排除了因 $C_n(z) = C_n$ 的假设以及 0cm 地表温度使用不当造成的偏差。

二、研究结果分析

1. 油松林的净辐射

(1) 油松林的总辐射 投射到油松林的太阳总辐射大部分被林冠所吸收, 约占 65—71%; 其次被反射掉占 11—15%, 以及小部分的透射 12—18%。如图 1 所示。

(2) 油松林的反射率 反射率大小除直接受太阳高度变化影响外, 还与下垫面的颜色、湿度及粗糙度等密切相关。油松林的反射率 10—15%, 刺槐林的反射率为 12—20%, 灌木虎榛子林反射率为 9—14%, 空旷黄土地 22.2%, 具有丰厚枯枝落叶层的油松林地, 反射率为 27—30%。反射率随太阳高度角的增大而减小, 反之亦然。

(3) 油松林的有效辐射 有效辐射的大小主要决定于作用面温度, 同时, 作用面湿度及天空云量(尤其夜间)对有效辐射的影响也较明显。晴朗的白天, 油松林(及刺槐林、虎榛子林)的温度低于空旷地, 故其有效辐射比空旷地小。

有效辐射的日变化不明显, 各时刻差异不大, 日变幅约 $20-30\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。另外, 以我们有限的资料分析, 可见 8 月晴天时温度较高, 空气湿度较大, 油松林的有效辐射反而较小, 为春、夏、秋 3 季中最小值, 见表 3。这主要是因为常温和常水汽压下, 空气湿度对有效辐射影响更大。空气湿度降低 1mb 与空气温度上升 3°C 对有效辐射的影响是等价的*。

* 吕星, 1988, 北京西山人工油松林冠结构和能量平衡的研究(硕士论文: 北京林业大学)。

(4) 油松林的净辐射 白天, 油松林的净辐射具有与总辐射相同的、明显的日变化。早晚日出和日落以后, 出现负值, 中午最大可达 $752.173\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。如图2所示。

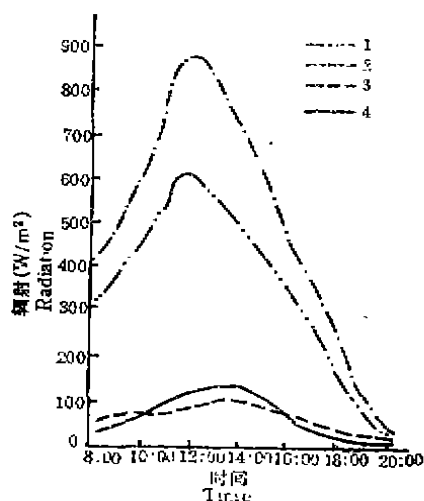


图1 辐射各分量日变化(4月28日晴)

1. 总辐射, 2. 吸收, 3. 反射, 4. 透过

Fig.1 Daily changes of all kinds of radiations (April 28, clear)

1. Total radiation, 2. Absorption radiation, 3. Reflection radiation, 4. Transmission radiation

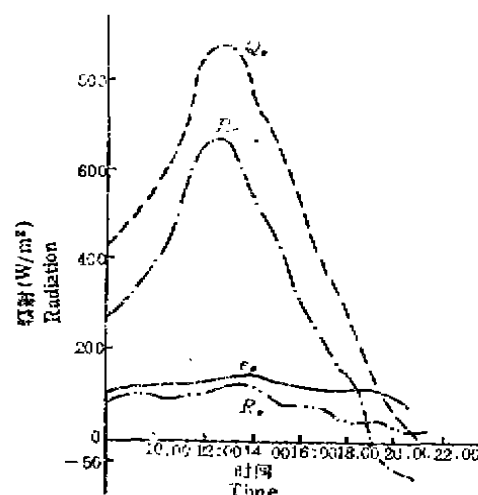


图2 油松林净辐射各分量日变化

Fig.2 Daily changes of all kinds items of the net radiation of the chinese pine forest

根据观测资料, 由于油松林及刺槐林、灌木林的反射率与有效辐射均小于空旷地, 因此, 净辐射值, 油松林及刺槐林和虎榛子灌木林均大于空旷地。而前三者净辐射值接近。油松林林地的净辐射累积值很小甚至为负值。

在观测资料中, 净辐值变化呈现一定季节性。8月份两天的观测结果, 净辐射占总辐射的比例较其它观测日大。其主要原因乃由于油松林的反射率季节变化不明显, 而有效辐射在夏季生长期明显小所致。表3给出了净辐射各分量日总累计值比较。

2. 油松林的能量支出

(1) 油松林的土壤热通量 土壤的热力状况决定于土壤的热量交换, 而一天或某个时段内土壤的热交换通量决定于土壤表面太阳辐射收支状况、地中温度梯度及土壤导热率等。温度梯度愈大, 土壤热交换愈大。

油松林地表土壤热交换日总量在热量平衡方程中所占比例较小。据观测资料, 变化范围在4.5—15%之间。如表4所示, 林地土壤较湿润, 导热性能良好, 因此土温梯度较小。而空旷地、刺槐林地土壤状况正相反, 故油松林林地土壤热通量小于空旷地和刺槐林地。如空旷地最大可达到 $194.284\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 而油松林地最大只有 $130.175\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 如图3所示。

然而, 土壤热通量的日变化是明显的, 图3所示, 上午日出以后, 土壤热通量不断增大, 至中午12时左右达到最大, 最大值出现的时间比地面温度出现的时间(一般在午后14时左右)提前2—3小时, 午后不断减少, 至16时以后, 土壤热通量开始变为零而转变为负值。

(2) 油松林湍流交换通量 作为近地层空气的一种不规则运动, 湍流运动的强弱与空

表 3 各类型净辐射比较($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$)
Table 3 Comparison of all kinds of net radiations

时 间 Time	类 型 Type	Q_0 总 辐 射 Total radiation	R_0 反 射 辐 射 radiation reflected	$\alpha(\%)$ 反 射 率 Albedo	ε_0 有 效 辐 射 Effective radiation	R_n 净 辐 射 Net radiation
4 月 28 日 28, Apr. (晴间云) Shine with little cloud	油 松 林	6.6898	0.8898	13.3	1.3299	4.4698
	刺 槐 林	6.7001	1.1599	17.3	1.1099	4.4297
	虎 榛 子 林	6.5100	0.8199	12.5	1.2899	4.3999
	空 旷 地	6.8397	1.4899	22.4	1.7400	3.4100
4 月 29 日 29, Apr. (晴间云) Shine with little cloud	油 松 林	6.3795	0.9198	14.4	1.1098	4.4398
	刺 槐 林	6.4499	1.1099	17.2	1.0000	4.3398
	空 旷 地	6.2399	1.4799	23.7	1.9799	2.7798
5 月 19 日 19, May (晴少云)	油 松 林	6.2001	1.0097	16.3	0.8400	4.3498
	虎 榛 子 林	6.2596	0.7100	11.3	0.7899	4.7597
5 月 20 日 20, May (晴) Shine	油 松 林	6.9897	0.9399	13.4	0.8800	5.1698
	刺 槐 林	6.9800	1.2799	18.3	0.8700	4.8298
8 月 3 日 3, Aug. (晴间云)	油 松 林	6.9900	0.9699	13.8	0.6897	5.3298
8 月 10 日 10, Aug. (晴) Shine	油 松 林	7.6700	0.9599	12.5	0.8199	6.0896
10 月 8 日 8, Oct (晴间云) Shine with little cloud	油 松 林	4.4698	0.5000	11.1	0.8700	3.0998
10 月 25 日 25, Oct (晴) Shine	油 松 林	3.9701	0.4983	12.6	0.9157	2.5600
	油 松 林	0.7398	0.2000	27.0	0.6897	-0.1500
	空 旷 地	4.1198	0.9499	23.1	1.6499	1.5200
10 月 28 日 28, Oct. (晴) Shine	油 松 林	3.9901	0.4636	11.5	0.9198	2.6098

气温度铅直梯度、风速梯度及下垫面粗糙度有关。

在数值上, 湍流热通量是油松能量平衡中一个较大的分量, 但是远小于蒸散耗热。油松林一个白天的湍流热通量(V_0)为 $1.5500\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$, 占净辐射的34.6%; 刺槐林为 $1.3600\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$, 占净辐射的30.7%; 虎榛子林 V_0 值为 $1.5300\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$, 占净辐射的34.8%; 空旷地 V_0 值为 $1.7100\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$, 占净辐射的50.147%, 为热量主要支出项之一。

湍流热通量白天变化明显, 午后13—14时左右达最大值, 如图4示, 最大值达 $240.3\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 在所观测林分中, V_0 值变化呈双峰曲线形式, 第一峰值在上午10时左右, 第二峰值即午后。上午10时左右, 林冠作用层温度上升很快, 而湿度则处在逐渐下降过程中, 加上空气增热对流和风速, 使湍流出现较大值, 也反应在波文比 $\beta(\beta = 0.64 \frac{\Delta T}{\Delta e})$ 的变化上。

(3) 油松林的蒸散耗热 油松林的蒸散耗热是主要的热量支出项, 晴天, 油松林蒸散耗热约占净辐射的45—64%, 平均为56.2%。作用层表面植被覆盖情况也与作用面蒸散量有密切关系。4月, 刺槐和虎榛子正值长叶, 此时, 常绿的油松林林分蒸散量明显比二者大。林木生长稳定阶段, 外界热力条件也相当, 林分总蒸散三者差异不大、均大于空旷地, 是空旷地蒸散的2—3倍。因为和林冠作用层相比, 空旷地高温低湿, 反射率大, 有效辐射

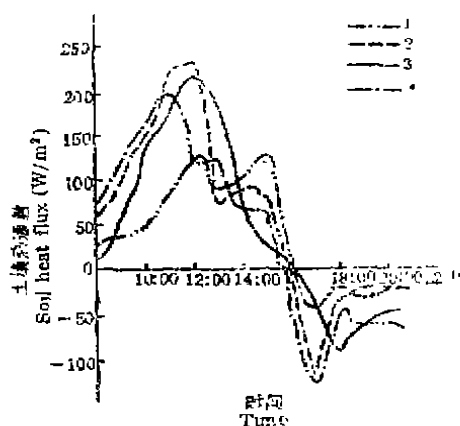


图 3 土壤热通量日变化比较(4月28日)
1. 油松林 2. 刺槐林 3. 虎榛子林 4. 空旷地
Fig.3 Comparison of the daily changes of soil heat fluxes of the studied plots(April,28)
1. *Pinus Tabulaeformis* carr. stand,
2. *Robinia Pseudoacacia* L. stand,
3. *Ostryopsis davidiana* Dence stand,
4. Empty site.

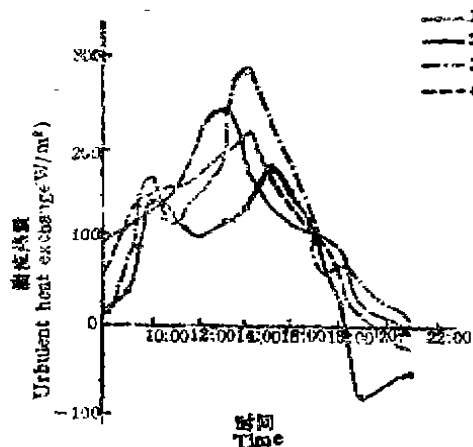


图 4 湍流热通量日变化比较(4月28日)
1. 油松林 2. 刺槐林 3. 虎榛子林 4. 空旷地
Fig.4 Comparison of the daily changes of turbulent heat fluxes of the studied plots (April,28)
1. *Pinus Tabulaeformis* carr. stand,
2. *Robinia Pseudoacacia* L. stand,
3. *Ostryopsis davidiana* Dence stand,
4. Empty site.

强, 净辐射收入小, 土壤湿度相对较低, 较小的净辐射分配于地表蒸发和相对林分而言并不弱的乱流交换(参见表 4), 导致了用于蒸发的热能总数明显小于净辐射收入大的油松林等林分。如 4 月 29 日, 油松林蒸散耗热达 $2.6101 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$, 而空旷地只有 $1.1700 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

如图 6 所示, 油松林的蒸散呈较好的单峰型日变化趋势, 早晚较小, 中午前后达到最大

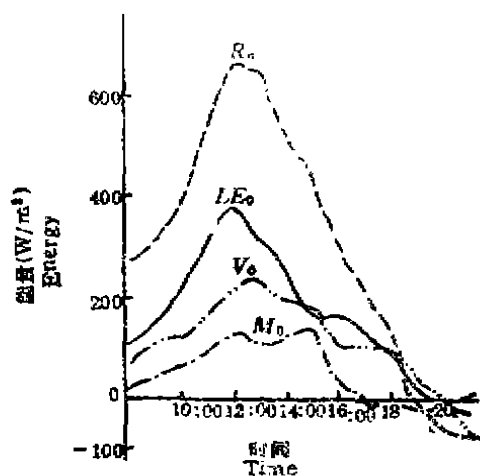


图 5 油松林能量平衡各分量日变化
Fig.5 Daily Changes of all kinds of items of energy balance of Chinese pine forest

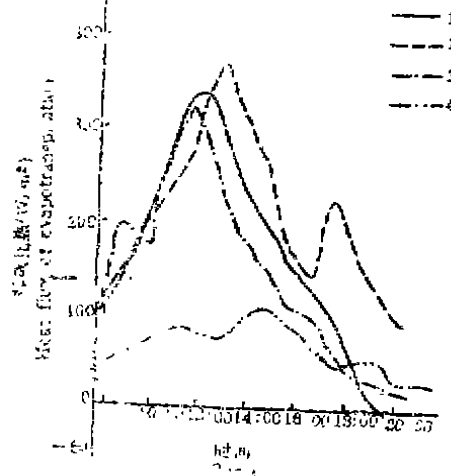


图 6 蒸散耗热日变化比较
1. 油松林 2. 刺槐林 3. 虎榛子林 4. 空旷地
Fig.6 Comparison of the daily changes of sensible heat fluxes
1. *Pinus Tabulaeformis* Carr. Stand,
2. *Robinia Pseudoacacia* L. Stand,
3. *Ostryopsis davidiana* Dence Stand,
4. Empty site.

值(约335—465W·m⁻²), 晚上20时以后出现负值即有凝结现象发生。

表 4 研究样地能量平衡各分量及其比例(kW·h·m⁻²)

Table 4 The value and percentage of all items of energy balance of the studied plots

日 期 Date	作用层 Action layer	R _n	LE ₀		V ₀		M ₀		V ₀ + LE ₀ R _e	β	蒸散水量 Water emitted (mm/d)
			LE ₀	LE ₀ /R _n	V ₀	V ₀ /R _n	M ₀	M ₀ /R _n			
4 月 28 日 28, Apr.	油松林	4.4698	2.2400	0.501	1.5500	0.347	0.6800	0.152	0.848	0.6919	3.2
	刺槐林	4.2544	2.2801	0.536	1.3600	0.319	0.7399	0.186	0.855	0.5965	3.3
	虎榛子林	4.3999	2.0901	0.475	1.5300	0.348	0.6397	0.157	0.823	0.7320	2.9
	空旷地	3.4100	0.9101	0.267	1.7100	0.502	0.7399	0.232	0.768	1.8789	1.3
4 月 29 日 29, Apr.	油松林	4.3498	2.6101	0.600	1.1900	0.274	0.5400	0.124	0.874	0.4559	3.7
	刺槐林	4.3398	2.0698	0.477	1.1800	0.272	1.0801	0.249	0.749	0.5701	2.9
	空旷地	2.7798	1.1700	0.477	0.9599	0.345	0.6499	0.234	0.766	0.8204	1.7
5 月 19 日 19, May	油松林	4.3498	2.3599	0.543	2.2000	0.386	0.5901	0.071	0.929	0.7118	3.4
	刺槐林	4.7597	2.4100	0.505	1.7798	0.373	0.5698	0.119	0.879	0.7385	3.5
5 月 22 日 22, May	油松林	5.1698	2.3700	0.458	1.6800	0.426	0.3099	0.112	0.884	0.9283	3.3
	虎榛子林	4.8298	2.9100	0.603	0.8898	0.1842	1.0100	0.209	0.787	0.3058	4.2
8 月 3 日 3, Aug.	油松林	5.3298	3.2300	0.606	1.3900	0.260	0.7000	0.121	0.866	0.4303	4.6
8 月 10 日 10, Aug.	油松林	6.0896	3.9100	0.643	1.3400	0.220	0.8300	0.136	0.863	0.3427	5.6
10 月 8 日 8, Oct.	油松林	3.0998	1.7400	0.561	1.2000	0.387	0.1500	0.048	0.948	0.6827	2.5
10 月 25 日 25, Oct.	油松林	2.5600	1.5801	0.617	0.5601	0.219	0.4101	0.160	0.836	0.3544	2.3
10 月 28 日 28, Oct.	油松林	2.6098	1.3600	0.533	0.4799	0.184	0.7301	0.279	0.717	0.3451	2.0
平 均 Average				0.562		0.300		0.134	0.862	0.5500	2.4

注: 表中平均值只限对油松林而言。

不同季节的观测结果表明, 随着太阳高度角的增加, 夏季太阳辐射增强, 油松林所获得的净辐射收入也不断增强, 用于蒸散的能量及其占净辐射的比例也增加, 故油松林的日蒸散量达到较大值, 8 月10日蒸散耗水达5.6mm, 8 月两日结果平均为 5.1mm/d, 体现了夏季油松林蒸散耗能和耗水量大的季节性特点。

另外, 根据实测资料作初步分析还可以看到, 4 月份和 5 月份观测日平均, 油松林日蒸散量为3.4mm/d, 10月份平均为 2.3mm/d, 与夏季(8 月)相比, 呈夏季大于春季, 春季又大于秋季的趋势。空旷地的蒸散量(土壤蒸发)明显小于油松林及刺槐林等, 4 月的两次平均仅为1.5mm/d。这主要与地面植被状况及树木生长的周期特性和当地气候季节性特点有关。

在忽略光合耗热和植被贮热的前提下, 能量平衡的结果表明, 油松林所捕获的能量净收入, 有85%以上用于地表以上植被和空气系统所耗散, 地表以下土壤热量交换只占 15% 以下。而能量收支分配各项指标已有各自特点(表 4), 具备了形成良好林分气候的基础。

图 5 给出了油松林能量平衡各分量的日变化, 表 4 给出了研究林分能量平衡各分量的日总量及其所占比例的综合状况和水分蒸散量。

三、初 步 结 论

1. 研究地区太阳能较丰富, 所得热量也较大。研究林分为密度较大的中、幼林、林内

辐射到达量很少,净辐射收入也很少。就整个林分来看,油松林的净辐射收入与刺槐林相当而大于空旷地。油松林的反射率在10—15%内变化。

2. 油松林的蒸散耗热是热量主要支出项占净辐射的56.2%,其次为湍流交换量,占净辐射的30.0%,二者构成油松林辐射能净收支的主要耗散项,土壤热通量只占净辐射的13.4%。油松林作为水土保持林(在当地为第一效益林),虽然生长较差,林冠层结构并非优化,但林分各项耗热指标已有明显差异,为特殊的林分小气候形成打下了基础。

3. 油松林的蒸散量4、5两月平均约3.4mm/d,8月平均约5.1mm/d,10月平均约2.3mm/d,明显大于没有植被的空旷地,呈现夏季大于春季,春季又大于秋季的基本变化特点。可为水资源开发和研究及水土保持综合效益分析提供基本的参考。

参 考 文 献

- [1] 翁笃鸣等, 1981, 《小气候和农田小气候》, 第69—80页, 农业出版社。
- [2] N.J. 罗森堡, 1974, 《小气候-生物环境》, 第40页, 科学出版社。
- [3] 贺庆棠、刘许昌, 1980, 森林的热量平衡, 林业科学 (1): 24。
- [4] 洪启发等, 1963, 马尾松幼林小气候, 林业科学 (4): 8—18。
- [5] 高素华等, 1987, 橡胶林的热量平衡, 气象学报 (3): 329—337。

THE ENERGY BALANCE OF A STAND (*PINUS TABULAEFORMIS* CARR.)

Xiao Wen-Fa

(The Research Institute of Forestry, CAF, Beijing)

Based on the observation data made in April to October 1988, with the method of Bowen ratio-energy balance, a preliminary study and calculations on the energy balance and the mean evapotranspiration ratio of a *Pinus tabulaeformis* carr. stand was taken in this paper in Jixian county, Shanxi province. The results were obtained as follows.

The radiation income of the stand is rich. The flux of evapotranspiration and turbulent heat exchange are 56.2% of the net radiation of the stand on average. The mean Bowen ratio is 0.5500. The energy consumed by soil heat exchange is 13.4%. The mean evapotranspiration ratio of the stand is 5.1mm/day in August, 3.4mm/day in April and May, 2.3mm/day in October. A tendency was found that evapotranspiration ratio in autumn is less than that in spring, and but that in summer is higher than that in spring.

Key words: *Pinus tabulaeformis* carr., energy balance.