

北京西山李子峪沟坡地的能量平衡

彭继伟

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所)

关裕亮

(北京林业大学林业系)

提 要 据1987年5—10月在北京西山李子峪沟观测所得的微气候资料,运用波文比-能量平衡法,研究了坡地的辐射状况及能量平衡的各分量变化规律。分析结果表明,与阴坡相比,阳坡总辐射强度、净辐射量均较大,在雨季(6—8月),阴阳坡蒸发散量均为3.4—4.4毫米/日,潜热通量占净辐射量比例,阳坡约62%,阴坡约67%,植被层下土壤热交换量占净辐射量比例,阳坡约16%,阴坡约12%。

关键词 北京 西山 坡地 能量平衡 辐射

北京西山属太行山系燕山山脉,大陆性半湿润季风气候,冬春寒冷干燥,夏季炎热多雨,年均温11.8℃,年降水量630毫米。历年来,北京西山荒坡造林投入了大量人力物力,但收效并不明显,所以提高当地土地资源利用率和造林成活率已成为急待解决的问题。

1987年5—10月由北京林业大学森林生态研究室在李子峪沟坡地上设置了微气象观测场和造林试验区。根据观测所得的资料,研究了坡地的辐射状况和能量平衡的各分量变化规律,为北京西山荒坡造林、立地条件评价提供了理论依据。

一、观测的场地、仪器及方法概述

观测场地设在李子峪沟的东北坡和西南坡,地处东经116°28′、北纬39°54′,海拔225米。东北坡坡向南西38°,坡度34°;西南坡坡向北东55°,坡度32°。两坡均具由凝灰岩发育而成的褐土,土壤厚度不一,平均约60厘米。西南坡植被生物量10.1吨/公顷,以生长荆条 *Vitex chinensis*、小叶鼠李 *Rhamnus parvifolia*、胡枝子 *Lespedeza bicolor*、酸枣 *Ziziphus jujuba*、菅草 *Themeda japonica*、白羊草 *Bothriochloa ischaemum* 等为多;东北坡植被生物量25.1吨/公顷,主要生长绒毛绣线菊 *Spiraea velutina*、黄栌 *Cotinus coggygria* 等。

两坡分别设有辐射观测场和空气温湿度观测场,辐射观测场内各有一块面积约10×10米的裸地,用作反照率和土壤温湿度观测。

在观测场内用通风干湿表测植被层上0.5米、1.5米、2.0米处的空气温湿度;用DFY-2型天空辐射表测太阳辐射(含直接辐射、散射、反射及总辐射);用曲管地温表测土壤深度5厘米、10厘米、15厘米、20厘米处的地温,用直管地温表测土壤深度40厘米、60厘米、80厘米处的地温,与此同时测土壤表面温度、最高最低温度;用取土烘干法测0—10厘米、10—20厘米、20—30厘米、30—40厘米层的土壤平均含水量;植被层温度

本文改回日期:1991-02-01.

用红外辐射温度计,经多点测定后取均值;土壤热物理参数委托中国科学院热物理研究所测定;植被蒸腾量的测定是选观测场内几种主要植物,用封蜡剪枝称重法^[1]测定蒸腾速率后取均值,并在测点附近同时测定辐射强度、空气温湿度梯度等。

二、采用的能量平衡模式

据能量守恒原理,确定坡地能量平衡的模式用

$$R_p = LE_p + H_p + G_p + LA_p, \quad (1)$$

式中 R_p 为坡地净辐射量; LE_p 为坡地潜热通量(蒸发散耗热量); H_p 为坡地显热通量(乱流热交换量); G_p 为坡地上植被作用层贮热量变化,即坡地植被层贮热量变化 G_v 与坡地植被层下土壤热交换量 G_s 之和; LA_p 为坡地上植被同化二氧化碳与呼吸二氧化碳所消耗的能量之和,该项甚微,可略而不计,于是式(1)便简化成

$$R_p = LE_p + H_p + G_p, \quad (2)$$

式(2)中各项参数的确定见参考文献[2—4]。

三、分析结果

阴阳坡分别指东北坡和西南坡。两者的辐射状况和能量平衡的各分量变化规律如下。

(一) 坡地辐射状况

1. 阴阳坡可照时数及辐射强度的差异

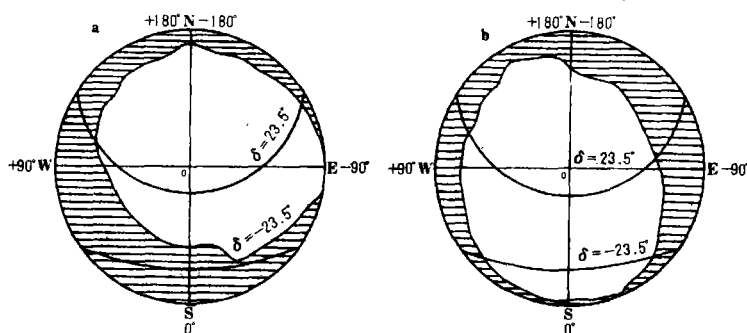


图1 阴坡(a)、阳坡(b)太阳遮蔽图

Fig. 1 Sunshading graphs of the shady (a) and sunny (b) slopes

一般认为,坡地本身的海拔对可照时数的影响可略而不计^[2]。坡地可照时数用不规则地形的太阳遮蔽图(图1)来确定。由图1可见,坡地可照时数受地形遮蔽影响较大。9月中旬以前阳坡比阴坡可照时数少,9月下旬以后则略多(表1)。阳坡若消除掉地形遮蔽的影响,能增加可照时数1—2时,增加太阳直接辐射量约4%(表2)。因而山区地形状况是影响坡地太阳辐射强度的重要因子。

坡向、坡度及太阳视位置对坡地直接辐射影响很大^[2]。研究结果表明,由于阴阳坡坡向有差异(坡度差异甚小),即使阴坡可照时数多,但总辐射强度仍以阳坡大于阴坡,且随太阳高度角变小而激增(见表1)。

表1 阴阳坡辐射状况的差异

Table 1 Radiative differences between the shady and sunny slopes

日期 1987	可照时数 (时)		总辐射量 (千焦/米 ² ·日)		裸地平均反射率 (%)		植被平均反射率 (%)		净辐射量 (千焦/米 ² ·日)		天气 状况
	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	
05-13	9.7	11.9	22895	20732	18.8	18.9	16.9	22.2	11503	8816	晴
05-14	9.7	11.9	21123	20584	19.9	18.2	17.7	21.3	10422	9543	
06-08	9.7	12.3	25691	24461	18.9	19.0	20.2	22.6	13533	11772	
07-17	9.7	12.2	22507	22384	19.6	16.9	21.0	20.8	13752	13329	阴
07-27	9.7	12.1	17533	16320	23.6	18.6	20.7	20.1	15286	15095	
08-09	9.6	11.4	21960	20353	21.6	18.3	21.0	21.6	11834	10360	
08-21	9.4	10.4	21047	19097	19.0	16.2	18.6	19.8	14830	14406	晴
09-09	9.1	9.3	14423	13293	20.1	16.0	20.0	18.8	6981	6217	
09-17	8.9	9.0	16067	12247	21.1	18.3	18.4	20.0	10328	7034	
09-22	8.8	8.6	13543	11475	19.7	19.0	16.8	19.1	8405	6329	
10-07	8.7	8.1	15309	9549	21.4	20.9	17.6	20.2	9442	3744	
10-15	8.7	8.1	13615	6028	19.1	17.0	15.1	18.3	10104	2591	

2. 阴阳坡下垫面反照率的差异

除山区地形状况外,下垫面的反照特征(如下垫面颜色、粗糙度、湿润状况等),对太阳辐射强度也有影响。坡地上裸地、植被的反照率观测结果显示,对裸地来说,阳坡则土壤表面不太湿润,土壤颜色较浅,利于光的反照,平均反照率一般有20%,而阴坡为18%;对植被而言,阴坡则植被覆盖度较高,植物叶表面反照特征较佳,植被平均反照率就以阴坡较大,为20%,而阳坡是19%。

3. 坡地辐射平衡的差异

观测资料分析结果表明,坡地净辐射强度的日变化趋势是:白天以太阳辐射为主,一般是正;

表2 受地形遮蔽影响的阳坡辐射状况

Table 2 Radiation of the sunny slope effected by landform shading

日期 1987	增加的可照时数 (时)	增加的直接辐射量 (千焦/米 ² ·日)	占直接辐射日总量比例 (%)
05-13	1.8	579	3.6
06-08	2.1	835	4.3
07-17	2.0	865	5.6
07-27	1.8	530	1.7
08-09	1.7	956	5.5
08-21	1.5	925	6.3
09-16	1.3	224	2.3
09-21	1.3	752	5.3
平均	1.7	708	4.3

日出日落前后,净辐射正负转换;夜间为有效辐射,一般是负,变化幅度不大;在上午,净辐射强度以阴坡比阳坡大,下午则反之。这与坡地总辐射强度日变化趋势一致。

坡地净辐射量,在晴天,通常以阳坡大于阴坡,在阴天或曇天,则差异较小(见表1)。

(二) 坡地能量平衡

1. 阴阳坡波文比 β 的日变化

β 值为坡地显热通量 H , 与坡地潜热通量 LE 之比。比值反映出乱流热交换量与蒸发散耗热量两者彼此消长情况, 并与坡地太阳辐射强度的变化、气流的强弱及下垫面的湿润状况等有关。当地坡面生长有高七八十厘米的灌丛, 下垫面较平坦而又均匀, 但坡地周围的地形复杂, 加之坡度达 30° 余, 坡地 β 值日变化(图 2)就复杂。

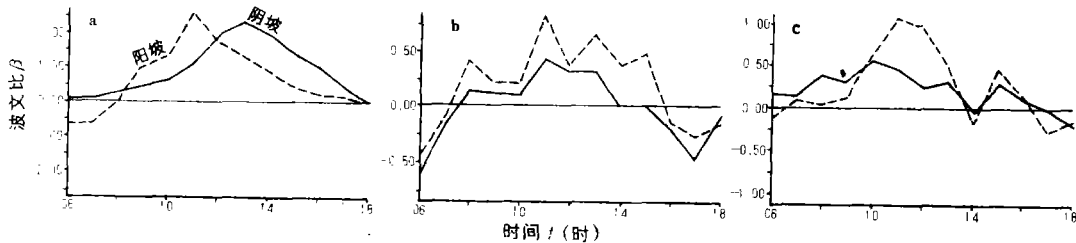


图 2 阴阳坡波文比 β 的日变化

Fig. 2 Bowen's ratio β of the shady and sunny slopes

- a. 下垫面较干燥, 晴天(观测时间: (1987-05-13), b. 下垫面较干燥, 阴天(1987-07-27);
c. 下垫面湿润, 雨天(1987-08-05)

由图 2 可见, 在不同的天气条件下, 阴阳坡 β 值日变化趋势基本相似: 晴天, β 值波动较慢, 阴天或雨天则较快。这可能与坡地太阳辐射强度变化引起的能量平衡各分量重新分配速率有关。若下垫面较干燥或晴天, 则坡地蒸发散耗热量减少, 坡地乱流热交换量增大, 坡地 β 值和其变动范围便较大(见图 2-a); 若下垫面较湿润或阴天雨天, 则坡地蒸发散耗热量增大, 坡地乱流热交换量减少, 坡地 β 值和其变动范围便较小(见图 2-b, c)。正午前后, 乱流热交换量达极大值, β 也达到峰值。

2. 坡地植物蒸腾作用及蒸腾耗热量的变化

表 3 阴阳坡植被蒸腾量变化

Table 3 Transpiration of vegetation in the shady and sunny slopes

日期	阳 坡			阴 坡			天气 状况
	蒸腾量 (克/米 ² ·日)	折合水量 (毫米/日)	折合能量 (千焦/米 ² ·日)	蒸腾量 (克/米 ² ·日)	折合水量 (毫米/日)	折合能量 (千焦/米 ² ·日)	
1987							
06-08	2760.8	2.76	6935	2142.8	2.14	5383	晴
07-17	2330.0	2.33	5853	1811.5	1.81	4551	
07-27	1205.5	1.21	3027	1028.0	1.03	2582	阴
08-05	2512.1	2.51	6310	2527.9	2.53	6350	多云
08-21	2489.3	2.49	6253	2193.9	2.19	5511	晴
平均	2259.5	2.26	5676	1940.8	1.94	4876	—

坡地蒸发散量包括坡地土壤蒸发量、植被蒸腾量和物理蒸发量。坡地有植被覆盖, 因而坡地植被蒸腾耗热量占坡地潜热通量 LE 很大的比例。坡地上几种主要植物的蒸腾作用观测结果表明, 白天植被平均蒸腾速率最大达 330 克/平方米·时, 均值 193 克/平方米·时。由表 3 (观测时段: 06—18 时) 可见, 晴天植被蒸腾量以阳坡大于阴坡, 阴天两坡植被

蒸腾量的绝对值与差值均较小。

由 38 个样本模拟坡地植被蒸腾速率 T_r (克/平方米·时)、坡地近地层 (1.5 米处) 的气温 T_a (°C) 与空气饱和差 D_a (帕), 以及坡地净辐射强度 R_n (焦/平方米·时) 的相关关系, 得下列经验模式

$$T_r = -590.9800 + 19.7087 T_a + 8.5106 D_a + 0.3303 R_n, \quad r = 0.7518. \quad (3)$$

检验结果显示, 式(3)相关关系显著, 其中以 R_n 与 T_r 的关系最密切, T_a 与 D_a 次之。

3. 坡地潜热通量 LE_p 与坡地显热通量 H_p 的变化

表 4 坡地能量平衡的各分量 (千焦/米²·日)

Table 4 Components (kJ/m²·d) of energy balance on the slopes

日期 1987	R_p		LE_p		H_p		G_a		G_v		蒸发散量(毫米)		天气及下垫面湿润状况
	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	
05-13	14776	11813	6225	5824	6889	5239	1568	728	94	21	2.5	2.3	晴, 较干燥
05-14	13276	12474	5904	4610	5347	6711	1941	1130	84	23	2.4	1.8	
06-08	17274	14886	10040	8454	5593	4959	1184	1424	36	48	4.0	3.4	晴, 湿润
07-17	15286	15095	10173	10958	2703	2276	2350	1910	59	7	4.1	4.4	
07-27	12175	12350	8132	8791	2849	2433	1160	1093	34	31	3.2	3.5	阴, 较干燥
08-05	13960	13065	8575	9783	3480	1503	1865	1731	39	47	3.4	3.9	多云, 湿润
08-09	15009	12701	9417	9040	2625	2367	2905	1251	59	38	3.8	3.6	晴, 湿润
09-09	9107	8319	6931	6160	570	1033	1605	1126	—	—	2.8	2.4	晴, 较湿润
09-10	7069	7295	5182	5236	656	751	1232	1306	—	—	2.1	2.1	阴, 较湿润
09-17	10382	7035	5934	5411	1759	567	2690	1055	—	—	2.4	2.2	晴, 较湿润
09-21	10649	4809	7194	3759	993	354	2561	695	—	—	2.9	1.5	晴, 较干燥
10-07	8709	3744	5471	2476	1620	715	1614	553	—	—	2.2	1.0	
平均	12306	10298	7432	6709	2924	2409	1885	1167	58	31	3.0	2.7	—

表 5 坡地能量平衡的各分量比值 (%)

Table 5 Component rates (%) of energy balance on the slopes

日期 1987	$(LE_p/R_p)100\%$		$(H_p/R_p)100\%$		$(G_a/R_p)100\%$		$(G_v/R_p)100\%$		$[(LE_p+H_p)/R_p]100\%$	
	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡
05-13	42.1	49.3	46.7	44.3	10.6	6.2	0.6	0.2	88.8	93.6
05-14	44.5	37.0	40.3	53.8	14.6	9.1	0.6	0.2	84.8	90.8
06-08	58.1	56.8	32.4	33.3	9.3	9.6	0.2	0.3	90.5	90.1
07-17	66.1	72.6	17.9	15.1	15.4	12.7	0.4	0.1	84.5	87.7
07-27	66.8	71.2	23.4	19.7	9.5	8.8	0.3	0.3	90.7	90.9
08-05	61.4	74.9	25.0	11.5	13.4	13.3	0.3	0.4	86.4	86.4
08-09	62.8	71.9	17.5	17.9	19.4	9.9	0.4	0.3	80.3	89.8
09-09	76.1	74.0	6.3	12.5	17.6	13.5	—	—	82.4	86.5
09-10	73.3	71.8	9.3	10.3	17.4	17.9	—	—	82.6	82.1
09-17	57.1	76.9	17.0	8.1	25.9	15.0	—	—	74.1	85.0
09-21	67.6	78.2	9.3	7.3	23.1	14.5	—	—	76.9	85.5
10-07	62.8	66.1	18.7	19.1	18.5	14.8	—	—	81.5	85.2
平均	61.6	66.7	22.0	21.1	16.2	12.1	0.4	0.3	83.6	87.8

据 β 值和式(1)计算出 LE_p 值和 H_p 值(表 4)。由表 4 可见, 与雨季相比, 下垫面较

干燥者, LE_p 值显著减小, H_p 值明显增大; 雨季(6—8月)的晴天, 阴阳坡 LE_p 值均达 8.4—10.5 千焦/平方米·日, 蒸发散量 3.4—4.4 毫米/日; 9、10 月的晴天, 阳坡的 LE_p 值一般大于阴坡的 LE_p 值, 阳坡蒸发散量仍在 2.0 毫米/日以上, 阴坡略低。

由表 5 可见, LE_p 占坡地净辐射量 R_p 比例: 阳坡平均约 62%, 阴坡平均约 67%; H_p 占 R_p 比例: 阳坡平均 22%, 阴坡平均 21%; $LE_p + H_p$ 占 R_p 比例: 阳坡平均约 84%, 阴坡平均约 88%。

4. 坡地上植被作用层贮热量变化 G_v

如前所述, 这由坡地植被层贮热量变化 G_v 和坡地植被层下土壤热交换量 G_s 两部分组成。 G_v 随植被层温度(含植被冠层温度与植被层内温度)不同而变。植被层温度的日变化比植被层上气温和植被层下土壤表面温度的日变化强烈, 植被冠层温度尤为如此, 但它们的日变化趋势基本一致(图 3)。

G_v 值的变化一般很小(见表 4)。白天的 G_v 占 R_p 比例不足 1% (见表 5); 只有在日出日落前后, 因 R_p 基数较小, 这一比例才较大。对能量平衡来说, G_v 值可略而不计。

阳坡的 G_v 值一般大于阴坡的 G_v 值(见表 4)。阳坡的 G_v/R_p 值也较高于阴坡的 G_v/R_p 值(见表 5): 阳坡平均约 16%, 阴坡平均约 12%, 这远高于 G_s/R_p 值。由此可见, G_p 值中最主要的是 G_s 值。

综上所述, 可归纳为下列几点。

1. 山区坡地地形状况是影响坡地太阳辐射不可忽视的因子。
2. 与阴坡相比, 阳坡的太阳总辐射强度、净辐射量一般都较大。裸地平均反照率: 阳坡 20%, 阴坡 18%; 植被平均反照率: 阴坡 20%, 阳坡 19%。
3. 坡地植被蒸腾速率 T_r 与坡地净辐射强度 R_n 关系最密切, 坡地近地层的气温 T_a 与空气饱和差 D_a 次之, 即

$$T_r = -590.9800 + 19.7080 T_a + 8.5106 D_a + 0.3303 R_n$$

4. 在雨季(6—8月), 阴阳坡蒸发散量 3.4—4.4 毫米/日; 9、10 月阳坡蒸发散量仍在 2.0 毫米/日以上, 阴坡略低。坡地潜热通量与坡地显热通量之和占坡地净辐射量比例: 阳坡平均约 84%, 阴坡平均约 88%, 其中坡地潜热通量占坡地净辐射量比例: 阳坡平均约 62%, 阴坡平均约 67%。

5. 坡地植被层下土壤热交换量占坡地净辐射量比例: 阳坡约 16%, 阴坡约 12%, 这

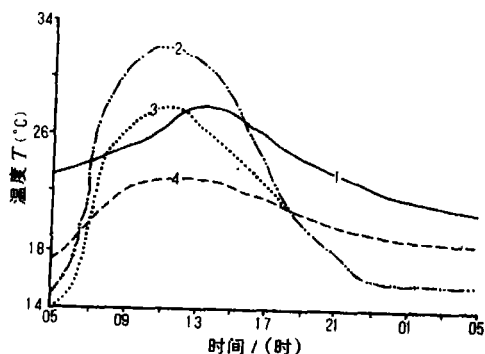


图 3 植被层上气温、植被层温度与植被层下土壤表面温度的日变化关系(观测时间: 1987-08-09)

Fig. 3 Relationships between the temperatures of air upper vegetation level, vegetation level and soil surface under vegetation level (observational time, 1987-08-09)

1. 植被层上气温; 2. 植被冠层温度; 3. 植被层内温度;
4. 植被层下土壤表面温度

远高于坡地植被层贮热量变化占坡地净辐射量比例(其 $< 1\%$)。因此对能量平衡来说,坡地植被层贮热量变化可略而不计。

参 考 文 献

- [1] 穆天民、阎伟, 1982, 兴安落叶松森林蒸腾的初步研究, 东北林学院学报, (2), 第 21—29 页。
- [2] 翁笃鸣等, 1981, 小气候和农田小气候, 农业出版社, 第 45—46, 79—80, 115—116 页。
- [3] 贺庆棠、刘祚昌, 1980, 森林的热量平衡, 林业科学, 16(1), 第 24—33 页。
- [4] 泰勒, S. A. (华孟等译), 1983, 物理的土壤学·灌溉与非灌溉土壤的物理学, 农业出版社, 第 37—38 页。

THE SLOPE ENERGY BALANCE IN LIZHIYU VALLEY OF THE WEST MOUNTAIN OF BEIJING

Peng Jiwei

(*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences
& Ministry of Water Conservancy*)

Guan Yufu

(*Forestry Department, Beijing Forestry University*)

Abstract

According to the climatical data, observed in Lizhiyu Valley of the West Mountain of Beijing ($116^{\circ}28'E, 39^{\circ}54'N$) during May—October of 1987, the investigations of the slope radiant conditions and all components of slope energy balance are analysed by the Bowen ratio-energy balance method. Its results are as follows:

1. By comparison with the shady slope, the total radiation and net radiation of the sunny slope are generally greater.

2. The average albedo of the denudated soil; the sunny slope is 20%, the shady slope 18%; the average albedo of vegetation; the sunny slope 19%, the shady slope 20%.

3. The evapotranspiration of the shady and sunny slopes in rainy season (from June to August) varied between 3.4—4.4mm/d; that of the sunny slope on September was still over 2.0mm/d, but that of the shady slope slightly smaller.

4. The sum of the latent and evident heat flux of the sunny slope are about 84% of slope net radiation, that of the shady slope about 88%; while the latent heat flux of the sunny slope are about 62% of slope net radiation, that of the shady slope about 67%.

5. The proportion of the soil heat flux under vegetation to slope net radiation; the sunny slope about 16%, the shady slope about 12%, are much more than that of the storing heat of the vegetation to slope net radiation ($< 1\%$).

Key words Beijing, West Mountain, slope, energy balance, radiation