

## 中国坡地光合有效辐射的特征分析

缪启龙 翁笃鸣 黄飞君

(南京气象学院)

**摘要** 利用坡地总辐射计算了我国 222 个站点坡地光合有效辐射,并由此分析了我国坡地光合有效辐射的时、空分布特征。

**关键词** 坡地,光合有效辐射

光合有效辐射是指太阳辐射中能被绿色植物利用生成有机物质的那一部分辐射。尽管由于分光仪器技术性能的差异,或者各个科学家的划分标准不一,光合有效辐射能量总是在  $0.37\sim 0.70\mu\text{m}$  左右。近三十年来,我国不少学者在光合有效辐射的观测和气候学计算方面作了许多研究和探讨,对我国农业气候的研究提供了基础性的科学依据。然而,以往的研究主要是讨论水平面上的光合有效辐射,对山区坡地的光合有效辐射的研究则很少涉及。基于我国是一个多山的国家,开发利用山区坡地资源是我国农、林、牧、副业生产发展的重要方向,因此很有必要研究坡地的光合有效辐射资源。本文试图分析我国坡地光合有效辐射的时、空分布特征。

### 1 光合有效辐射的气候学计算

光合有效辐射的实际观测资料甚少,且通常仅是短期的科学考察的观测,而理论计算又较复杂。因此,光合有效辐射的气候学计算仍是当前计算光合有效辐射的可行的、有效的途径。

光合有效辐射的气候学计算方法很多。周允华等在讨论了各种计算方法后提出了以太阳光总辐射和水汽压为参数的计算方程<sup>[1]</sup>

$$Q_{PAR} = Q(0.384 + 0.053\log e^*) \quad (1)$$

并认为该式的普适性较强,精度较高。本文即用该式计算坡地的光合有效辐射。(1)式中  $Q$  为坡地太阳总辐射,  $e^* = (\frac{p_0}{p}) \cdot e$ ,  $p$  为本站气压,  $p_0$  为海平面标准大气压,  $e$  为本站地面水汽压。该式表明,光合有效辐射与太阳总辐射和水汽压密切相关。

### 2 资料

本文所用的气象资料为各台站的整编资料,坡地太阳总辐射则由文献[2]提供,其中坡地太阳直接辐射和坡地散射辐射用下式求得

$$S_{\alpha\beta} = \frac{I_0}{2\pi R^2} [U \sin\delta(\omega_2 - \omega_1) + V(\sin\omega_2 - \sin\omega_1) - W \cos\delta(\cos\omega_2 - \cos\omega_1)] \cdot (a + bs_1) \quad (2)$$

其中

$$U = \sin\varphi \cos\alpha - \cos\varphi \sin\alpha \cos\beta$$

$$V = \cos\varphi \cos\alpha + \sin\varphi \sin\alpha \cos\beta$$

$$W = \sin\alpha \sin\beta$$

这里  $\alpha$ 、 $\beta$  为坡度、坡向,  $\delta$  为太阳赤纬,  $\omega_2$  和  $\omega_1$  为坡地开始和终止日照的时角,  $I_0$  为太阳常数,  $1/R^2$  为日地平均距离的订正,  $s_1$  为日照百分率,  $a$ 、 $b$  为经验系数,  $S_{\alpha\beta}$  为坡地太阳直接辐射。

$$D_{\alpha\beta} = D_0 \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) + F(n) A_D(h_0 \cdot \alpha) \cos\beta \quad (3)$$

其中  $D_{\alpha\beta}$ 、 $D_0$  分别为坡面实际散射辐射和水平面实际散射辐射<sup>[2]</sup>。

$$F(n) = 1 - (0.08n + 0.02n_L)$$

$$A_D(h_0 \cdot \alpha) = 35.1 \cosh_0 \sin(1.42\alpha)$$

这里  $h_0$  为平均正午太阳高度角,  $n$ 、 $n_L$  分别为总云量和低云量。

### 3 光合有效辐射随坡度坡向的变化

为了分析我国坡地光合有效辐射的时空特征。本文计算了全国 222 个站点坡度分别为  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ ; 坡向分别为  $0^\circ$  (南坡)、 $|45^\circ|$  (东南、西南坡)、 $|90^\circ|$  (东、西坡)、 $|135^\circ|$  (东北、西北坡)、 $180^\circ$  (北坡) 的坡地 1—12 月及年平均的光合有效辐射量。

#### 3.1 坡向的影响

表 1 不同方位坡面光合有效辐射的月平均 ( $W/m^2$ ) ( $\alpha=20^\circ$ )

方	位( $^\circ$ )	0	45	90	135	180	225	270	315	360
一 月	漠 河	31.3	26.7	17.0	8.2	6.4	8.2	17.0	26.7	31.3
	长 春	52.4	46.5	33.8	20.6	13.9	20.6	33.8	46.5	52.4
	太 原	62.3	56.4	43.4	29.7	22.5	29.7	43.4	56.4	62.3
	南 京	51.5	47.8	39.5	30.6	25.9	30.6	39.5	47.8	51.5
	广 州	57.0	53.9	47.0	39.4	35.5	39.4	47.0	53.9	57.0
	海 口	55.8	53.1	46.9	40.1	36.7	40.1	46.9	53.1	55.8
七 月	漠 河	86.4	86.3	84.0	79.8	78.8	79.8	84.0	86.3	86.4
	长 春	90.3	90.8	89.8	87.4	86.8	87.4	89.8	90.8	90.3
	太 原	102.0	103.0	103.2	101.6	101.4	101.6	103.2	103.0	102.0
	南 京	93.1	94.5	95.9	96.0	95.9	96.0	95.9	94.5	93.1
	广 州	88.7	90.9	94.1	96.0	97.1	96.0	94.1	90.9	88.7
	海 口	95.2	98.0	102.3	105.0	106.4	105.0	102.3	98.0	95.1

表 1 是部分台站坡面光合有效辐射  $Q_{PAR}$  随坡向变化的资料。表明 1 月的  $Q_{PAR}$  是南坡最大, 自南坡向东西坡方向逐渐减小, 至北坡最小; 南北坡之间  $Q_{PAR}$  的差异随着纬度的增加而增大。7 月山区坡向对光合有效辐射的影响显得较复杂, 自漠河起随着纬度的降低, 各坡向光合有效辐射的最大值自南坡向东西坡转移, 漠河南坡最大, 长春西南坡最大, 太原西坡最大, 南京

西北坡最大,至广州、海口则以北坡最大,南坡最小。

### 3.2 坡度的影响

自然植被不仅在不同坡向上而且在不同坡度上均有不同的适应性。不同坡度上的光合有效辐射的强弱,对植物的生长有显著影响。图 1 是我国部分台站光合有效辐射随坡度的变化。由图可见,1 月我国各地不同南坡坡度上的光合有效辐射均比平地大,且在某一坡度上有

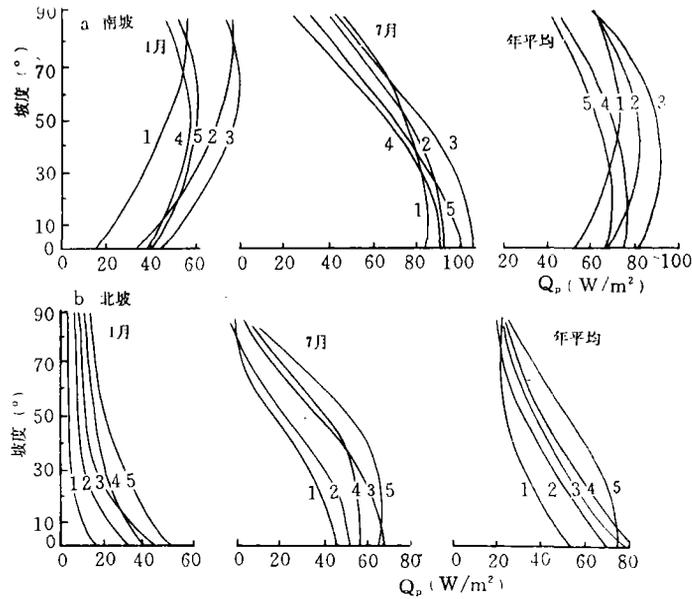


图 1 坡地光合有效辐射随坡度的变化

一极大值,我们称这个坡度为光合有效辐射的极大值坡度  $\alpha_{max}$ ,也称最热坡。这主要是由于太阳直接辐射在一月南坡有一个极大值坡度的缘故。作者在文献[4]中指出,在中、低纬度冬半年各月,南坡均存在一个最热坡,而夏半年有些月份则没有。在  $\varphi > 40^\circ N$  的较高纬度地区,南坡全年均有最热坡存在,且夏半年最热坡坡度小于冬半年最热坡坡度(表 2)。

表 2 南坡直接辐射极大值坡度的分布

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
15	45	34	18	0	0	0	0	0	10	28	41	47
纬	20	50	39	23	5	0	0	0	15	33	46	52
	25	55	44	28	10	0	0	0	2	20	38	51
	30	60	49	33	15	0	0	0	7	25	42	55
度	35	65	53	38	20	3	0	0	12	30	47	60
	40	70	58	43	25	8	0	2	17	35	52	64
	45	71	63	48	30	13	2	7	22	40	57	69
(°N)	50	76	67	53	35	18	7	12	27	45	62	73
	55	80	72	58	40	23	12	17	32	50	67	77
	60	84	76	63	45	28	17	22	37	55	71	85

南坡 7 月除较高纬度地区在坡度很小时  $Q_{PAR}$  略大于水平地面,其他纬度和各坡度  $Q_{PAR}$  均小于平地,且随坡度的增大而减小,尤其是低纬度地区,  $Q_{PAR}$  的这种减小特别明显。如海口,  $\alpha=70^\circ$  时,坡面光合有效辐射仅为平地的 44%;  $\alpha=90^\circ$  时,则仅为平地的 27%(表 3)。

表 3 各坡度光合有效辐射与水平地面光合有效辐射的比值  $K$

		南坡 ( $\beta=0^\circ$ )										
坡 度 ( $^\circ$ )		0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	90
一 月	漠 河	1.00	1.25	1.50	1.74	1.97	2.40	2.77	3.07	3.30	3.45	3.47
	长 春	1.00	1.16	1.31	1.45	1.59	1.84	2.04	2.20	2.30	2.34	2.26
	太 原	1.00	1.12	1.23	1.34	1.44	1.61	1.74	1.83	1.87	1.86	1.71
	南 京	1.00	1.08	1.15	1.23	1.29	1.40	1.47	1.51	1.50	1.48	1.31
	海 口	1.00	1.05	1.09	1.13	1.17	1.22	1.24	1.23	1.21	1.16	0.99
七 月	漠 河	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	0.99	0.96	0.94	0.84	0.76	0.58
	长 春	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.95	0.90	0.83	0.75	0.66	0.46
	太 原	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.86	0.79	0.70	0.60	0.40
	南 京	1.00	0.99	0.98	0.97	0.95	0.89	0.83	0.74	0.66	0.55	0.35
	海 口	1.00	0.98	0.96	0.94	0.91	0.84	0.75	0.65	0.55	0.44	0.27
年 平 均	漠 河	1.00	1.06	1.11	1.21	1.28	1.33	1.35	1.34	1.30	1.16	1.00
	长 春	1.00	1.05	1.09	1.12	1.15	1.19	1.21	1.20	1.16	1.10	0.91
	太 原	1.00	1.04	1.07	1.09	1.11	1.13	1.13	1.10	1.05	0.98	0.78
	南 京	1.00	1.03	1.05	1.06	1.07	1.07	1.05	1.05	0.95	0.87	0.68
	海 口	1.00	1.01	1.02	1.02	1.02	0.99	0.95	0.90	0.82	0.73	0.50
		北坡 ( $\beta=180^\circ$ )										
一 月	漠 河	1.00	0.76	0.54	0.41	0.40	0.39	0.40	0.41	0.42	0.44	0.48
	长 春	1.00	0.84	0.69	0.55	0.42	0.35	0.34	0.33	0.34	0.34	0.36
	太 原	1.00	0.88	0.75	0.63	0.52	0.34	0.32	0.30	0.29	0.27	0.24
	南 京	1.00	0.91	0.83	0.74	0.65	0.49	0.40	0.37	0.34	0.31	0.25
	海 口	1.00	0.95	0.89	0.83	0.77	0.64	0.52	0.44	0.40	0.37	0.30
七 月	漠 河	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.86	0.78	0.68	0.58	0.53	0.46
	长 春	1.00	0.99	0.98	0.97	0.94	0.89	0.81	0.72	0.62	0.52	0.41
	太 原	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.91	0.84	0.75	0.66	0.55	0.40
	南 京	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.93	0.87	0.79	0.70	0.60	0.41
	海 口	1.00	1.01	1.02	1.02	1.01	0.98	0.94	0.87	0.79	0.69	0.46
年 平 均	漠 河	1.00	0.94	0.87	0.81	0.76	0.66	0.58	0.52	0.47	0.44	0.42
	长 春	1.00	0.95	0.90	0.84	0.78	0.68	0.58	0.50	0.44	0.38	0.32
	太 原	1.00	0.96	0.91	0.86	0.81	0.71	0.61	0.53	0.45	0.39	0.30
	南 京	1.00	0.97	0.94	0.90	0.85	0.76	0.67	0.59	0.51	0.43	0.32
	海 口	1.00	0.98	0.96	0.94	0.91	0.84	0.75	0.67	0.58	0.51	0.37

北坡 1 月光合有效辐射随坡度  $\alpha$  的增加而减小,这一现象尤其在坡度  $\alpha$  较小时更为显著

在较高纬度 1 月北坡光合有效辐射存一拐点。在拐点坡度以下,光合有效辐射随坡度增加而减小显著,在此坡度以上,北坡光合有效辐射随坡度的变化较小。北坡 1 月光合有效辐射随坡度变化的拐点所在坡度随纬度的增加而减小,这是因为北坡 1 月太阳直接辐射有一零值坡度所致<sup>[4]</sup>。

北坡 7 月光合有效辐射随坡度的变化在纬度较小的海口有一个极大值,其余各地则均表现为随坡度增加而减小。在理论上,北坡 7 月的太阳直接辐射在坡度  $\alpha \leq 90 - \varphi + \sigma$  时,也可以出现先增加后减小的特点<sup>[4]</sup>。北坡  $Q_{PAR}$  随坡度的变化冬季大于夏季,如太原  $\alpha = 50^\circ$  时,1 月为平地的 30%,7 月为平地的 75%。

年平均光合有效辐射随坡度的变化为南坡小,北坡大。南坡有一极大值坡度  $\alpha_m$ ,但年平均值的极大值坡度小于 1 月南坡极大值坡度。除较大坡度外,各地南坡年平均光合有效辐射均大于平地,具有较充裕的光合有效辐射能量。北坡年平均光合有效辐射则一致表现为随坡度的增大而减小。

至于东(西)坡的光合有效辐射则较接近于平地光合有效辐射,且有随坡度的增大而减小的趋势,但变化较小。东南(西南)坡的  $Q_{PAR}$  介于南坡与东(西)坡之间,但其特征更像南坡;东北(西北)坡的  $Q_{PAR}$  介于东(西)坡与北坡之间,其特征近似北坡(表略)。

## 4 地形遮蔽对坡地光合有效辐射的影响

在山区,任何坡地均受到周围地形的遮蔽,致使到达坡地的太阳光合有效辐射减小。由于实际地形遮蔽的无规律性,难以建立较好的数学模型,所以要计算周围地形对坡地光合有效辐射的遮蔽影响是困难的。但不难设想,不管遮蔽地形如何复杂,对于某一坡地,我们总可以确定一个平均的遮蔽状况,用这个平均遮蔽状况讨论地形对坡地光合有效辐射的影响,就可以使问题大为简化。实际上,地形遮蔽对坡地光合有效辐射的影响,主要是由于遮蔽太阳直接辐射而引起的。作者在文献[4]中指出,由理论分析和实际计算,当遮蔽角  $\theta$  不大( $\theta < 90 - \varphi + \delta$ )时,地形遮蔽对坡地直接辐射的影响主要表现在推迟和提前坡地的开始和终止日照时刻上,而日间其它时刻,一般不影响。其中以对南坡的相对影响最大,东(西)坡次之,北坡最小(表略)。由于散射辐射的作用,地形对坡地光合有效辐射的影响要小于对坡地直接辐射的影响。遮蔽角  $\theta$  较大时,对坡地光合有效辐射影响较显著;当遮蔽角  $\theta < 20^\circ$  时,则对坡地光合有效辐射的影响较小,减小量小于 5%; $\theta < 10^\circ$  时,减小量更小于 2%。在实际起伏地形中,周围山地对坡地的遮蔽是不大的(多数  $\theta < 20^\circ$ )。因此,在实际坡地光合有效辐射计算中,一般只需考虑坡地自身地形参数影响即可,这大大地减少了坡地光合有效辐射计算的困难。

## 5 我国坡地光合有效辐射的时空分布

### 5.1 坡地光合有效辐射的年变化

作者在文献[4]中讨论坡地直接辐射年变化时指出南、北坡直接辐射的年变化幅度远大于水平面,差异较大。以黄山  $30^\circ$  坡为例,南坡冬季大于夏季,北坡夏季大于冬季。而光合有效辐射则由于散射辐射的影响,使得坡地光合有效辐射年变化规律基本上与水平面相近,只是北坡年变化稍大于水平面,南坡稍小于水平面而已(表 4);东(西)坡光合有效辐射的年变化与水平

表 4 黄山坡地光合有效辐射的年变化( $\alpha=30^\circ$ )

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
水平面	28.7	35.8	49.1	60.1	62.2	65.5	76.1	78.2	50.1	36.0	30.4	26.0
南 坡	34.4	40.8	52.9	59.1	57.2	58.3	68.2	74.3	51.4	39.1	35.7	31.2
西南坡	32.4	39.0	51.4	59.0	58.0	60.0	70.1	75.2	50.6	37.7	33.7	29.3
西 坡	27.9	34.7	47.3	57.1	58.9	62.0	72.2	74.3	47.7	34.3	29.3	25.2
西北坡	23.1	29.9	41.9	53.5	58.1	62.7	72.1	70.9	43.6	30.3	24.5	20.8
北 坡	20.5	27.1	38.9	51.7	57.9	63.2	72.4	69.2	41.4	28.0	21.8	18.5

面的年变化一致,数值稍小一些,约为水平面的 95%;东南(西南)坡的年变化与南坡相近,东北(西北)坡与北坡相近。

表 5 是南、北坡光合有效辐射与水平面光合有效辐射的比值  $k$  的年变化。可见,冬半年各地南坡的  $Q_{PAR}$  均大于水平面,且  $k$  值随纬度的增加而增大;夏季除了纬度较高的漠河外,其余各地均有一部分时间南坡小于水平面,  $k < 1$ 。  $k < 1$  的时间随着纬度降低而增长。北坡的  $Q_{PAR}$  全年均小于水平面,且夏季北坡光合有效辐射较大,接近于水平地面,而低纬度的韶关、海口等地的  $k$  还可大于 1.00。

表 5 坡地光合有效辐射比值  $k$  的年变化( $\alpha=20^\circ$ )

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年	
南 坡	漠 河	1.97	1.59	1.32	1.13	1.04	1.00	1.01	1.07	1.20	1.42	1.75	2.03	1.21
	沈 阳	1.50	1.34	1.18	1.06	1.00	0.96	0.98	1.03	1.13	1.26	1.42	1.57	1.13
	宜 昌	1.22	1.15	1.07	1.01	0.96	0.94	0.94	0.99	1.06	1.14	1.22	1.24	1.04
	韶 关	1.20	1.10	1.04	0.99	0.95	0.92	0.92	0.97	1.03	1.11	1.20	1.22	1.03
	海 口	1.17	1.09	1.03	0.98	0.92	0.90	0.91	0.95	1.02	1.10	1.17	1.19	1.01
北 坡	漠 河	0.40	0.42	0.63	0.80	0.90	0.94	0.92	0.84	0.71	0.52	0.43	0.41	0.76
	沈 阳	0.50	0.59	0.73	0.85	0.93	0.96	0.95	0.89	0.79	0.66	0.53	0.47	0.80
	宜 昌	0.72	0.78	0.85	0.91	0.96	0.99	0.98	0.93	0.87	0.79	0.72	0.55	0.88
	韶 关	0.74	0.83	0.89	0.94	0.98	1.00	1.00	0.95	0.89	0.81	0.73	0.71	0.89
	海 口	0.77	0.88	0.94	0.95	1.00	1.02	1.01	0.97	0.90	0.82	0.75	0.74	0.91

## 5.2 坡地年平均光合有效辐射的分析

图 2 是我国南、北坡( $\alpha=20^\circ$ )的年平均光合有效辐射分布。可见无论南、北坡,我国坡地光合有效辐射总是长江中下游一带小,华北—青藏高原较大。最小在四川盆地至云贵高原,南坡为  $50\text{W}/\text{m}^2$  左右,北坡仅  $45\text{W}/\text{m}^2$  左右;最大值位于青藏高原,南坡在  $100\text{W}/\text{m}^2$  以上,北坡也在  $70\text{W}/\text{m}^2$  以上。

## 5.3 冬季(1月)坡地光合有效辐射的分布

南坡冬季光合有效辐射的分布趋势大致相近于年平均分布,但在东部平原、丘陵向青藏高原过渡的地形台阶上,东西向梯度加大,等值线密集。最小值位于四川盆地,仅  $25\text{W}/\text{m}^2$ (图 3 a)。由于纬度的影响,东北北端为又一低值区;华北至青藏高原一线较大,最大值位于西藏南部,达  $100\text{W}/\text{m}^2$  以上。而北坡冬季则较年平均分布简单得多,全国分布比较均匀,由北向南增

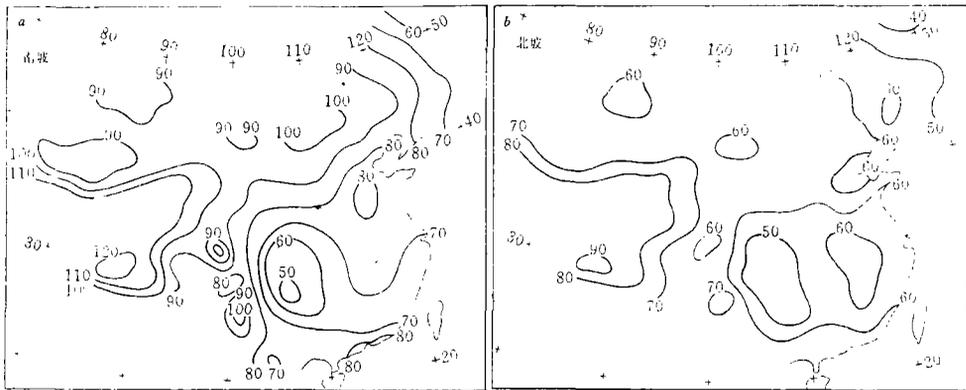


图2 坡地年平均光合有效辐射的分布( $\alpha=20^\circ$ )

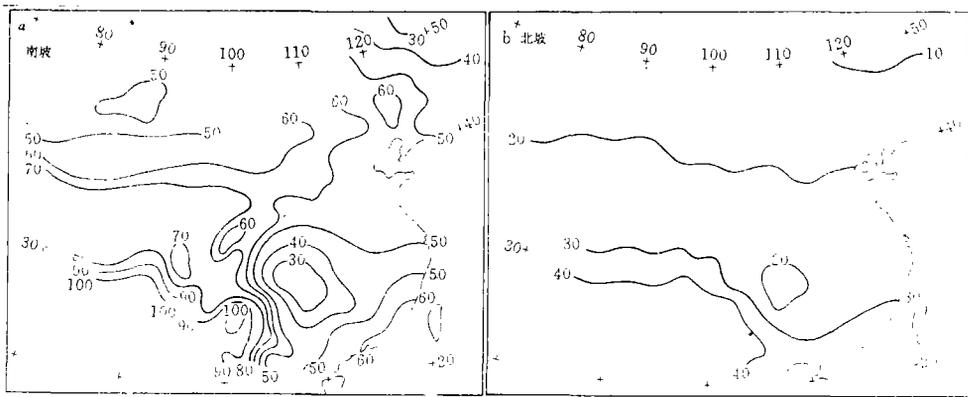


图3 坡地1月光合有效辐射分布( $\alpha=20^\circ$ )

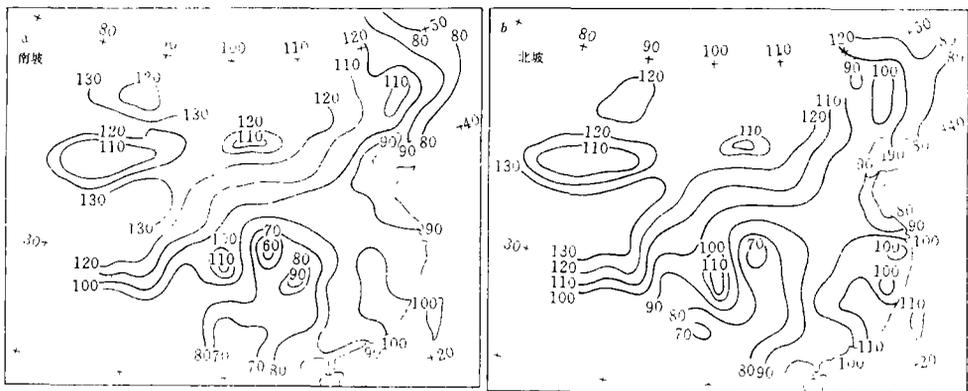


图4 坡地7月光合有效辐射分布( $\alpha=20^\circ$ )

大,最低在漠河仅  $6.4W/m^2$ ,东南沿海、滇西南达  $40W/m^2$  以上,广大地区为  $10-30W/m^2$ ,四川盆地为小于  $20W/m^2$  的闭合中心(图 3b)。

### 5.4 夏季(7月)坡地光合有效辐射的分布

夏季坡地光合有效辐射的分布较年平均分布、1月分布都更为复杂。南坡7月明显地表现

为西、北部大,东部小。大于  $100\text{W}/\text{m}^2$  的高值带自东北西部经东北至青藏高原一线以西,最高值在新疆塔里木盆地,大于  $130\text{W}/\text{m}^2$ 。中东部地区较小,云贵高原、四川盆地最小,滇西南仅  $65\text{W}/\text{m}^2$  左右,四川盆地的雅安不足  $60\text{W}/\text{m}^2$ 。黄河以南,长江中、下游至东南地区较均匀,大都为  $90-100\text{W}/\text{m}^2$ ,东南沿海稍大,大于  $100\text{W}/\text{m}^2$ (图 4a)。北坡 7 月光合有效辐射分布趋势与南坡 7 月分布趋势基本一致,极值也大致相近。不同之处,长江中下游较黄河一带稍大一些(图 4b)。

## 6 小 结

1 山区坡地光合有效辐射可通过坡地总辐射进行计算,这对了解山区农业气候资源是有实际意义的。

2 地形遮蔽对坡地光合有效辐射的影响较小,在地形遮蔽角小于  $20^\circ$  时,地形遮蔽的影响可以忽略不计。

3 我国坡地光合有效辐射的时空变化均较显著。坡地光合有效辐射的空间分布基本上与总辐射分布一致。我国西部、北部大,南部、中部小,最小在四川盆地、云贵高原,最大在华北至青藏高原。

## 参 考 文 献

- 1 周允华等. 气象学报, 1984, (4), 387—397
- 2 孙治安等. 地理学报, 1989, (4), 441—448
- 3 欧阳海等. 农业气候学, 气象出版社, 1990
- 4 缪启龙等. 南京气象学院学报, 1989, (2), 175—186
- 5 牛文远. 农业自然条件分析, 农业出版社, 1981
- 6 Stanlill G. *J Appl Ecology*, 1977; 14(3), 319—322

# ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF THE HILLSIDE PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION IN CHINA

Miao Qilong Weng Duming Huang Feijun

(Nanjing Institute of Meteorology)

**Abstract** The hillside photosynthetically active radiation from 222 observational stations in China is calculated by using the hillside total radiation. On this basis the temporal and spatial distribution of the hillside photosynthetically active radiation in China is analyzed in much detail.

**Key words** hillside, photosynthetically active radiation