

我国陆地生态系统的植物太阳能利用率*

朱志辉 张福春

(中国科学院地理研究所)

摘 要

本文计算分析了我国陆生植物在各种情况下的净初级生产力及其太阳能利用率。

计算表明,每年进入我国960万平方公里国土上的太阳总辐射 Q 和光合有效辐射 PAR 分别为 13×10^{18} 千卡和 6.4×10^{18} 千卡,其所含能量约合标准煤20,000亿吨和10,000亿吨。在充分利用我国光、温、水气候资源,而其他条件都处于最适状况时每年净初级气候潜力 $Y_{p, w}$ 的全国总量为250亿吨(植物干重,下同)。由植被产量的实际资料与气候因子的经验关系估算的自然植被产量 Y_n 的全国总量为每年70亿吨。

就全国加权平均单产而言,净初级光能潜力 $Y_p = 87$ 吨/公顷·年;净初级光温潜力 $Y_{p, t} = 50$ 吨/公顷·年;净初级气候潜力 $Y_{p, w} = 30$ 吨/公顷·年;自然植被生产力 $Y_n = 8$ 吨/公顷·年;现阶段主要农作物的净初级实际生产力 $Y_a = 8.7$ 吨/公顷·年。各省区情况见表1。

太阳能利用率:就全国加权平均而言,如果把总辐射 Q 计为100%,则光合有效辐射 PAR 约占49%;具有最佳叶冠层的高产植物在生长盛期对 Q 的利用率上限为7%;相应于 Y_p 、 $Y_{p, t}$ 、 $Y_{p, w}$ 和 Y_n 的太阳能利用率 R_p 、 $R_{p, t}$ 、 $R_{p, w}$ 和 R_n 分别为2.5%、1.4%、0.82%和0.22%;我国当前主要农作物的净初级产量对我国农田上 Q 的利用率 R_a 为0.28%。各省区情况见表2。

生态学领域称Biomass为生物量,定义为一个群落内所有有机物质的总重量,常以干重表示。能源领域称Biomass为生物质,主要指适合于转化为能源的植物和动物物质,其中包括乔木、灌木、其他木本植物、草类、其他草本植物、能源作物、农产残余物、藻类、水生植物和人畜粪便等等。

本文从生态系统能流的初始阶段出发,首先计算每年进入我国陆地生态系统的太阳能总量及其可被植物利用部分的总量,然后计算分析各种条件下净初级生产潜力的分布和太阳能利用率,进而用比较详细的资料计算分析我国自然植被产量和主要农作物当前实际产量对太阳能的利用率和省区分布,最后对各种潜在生产力和实际生产力及其太阳能利用率进行对比,分析限制因子及其影响程度,从而给出我国太阳能资源生物利用效率的一般图象。

必须指出,植物的净初级生产力包括地上和地下部分,并不单独考虑经济产量,也不扣除枯死凋落损失。为了相互比较,本文所有生产力和产量都用于干重表示,如想换算为自然风干情况(约含水分15%),只须将干重除以0.85即可。

一、每年进入我国陆地生态系统的太阳辐射总量

根据我国太阳能分布的非线性回归模式(朱志辉,1984),用全国534站(包括辐射测

* 承蒙左大康先生对本工作关心支持,谨致谢意。

站)的实测和计算资料绘制了总辐射 Q 的分布图(略)。光合有效辐射 PAR (波长范围为0.38—0.71微米)的计算采用莫尔达乌等人的以下经验公式(叶菲莫娃, 1977): $PAR = 0.43S' + 0.57D$, 式中 S' 和 D 分别为直接辐射和散射辐射。公式中的两个系数与牛文元(1980)计算的我国华北地区的系数(0.415和0.56)相当接近。用全国60余站 S' 和 D 的实测年总量计算 PAR , 结果发现比值(PAR/Q)从0.47变化到0.52, PAR/Q 与相对日照 k 之间存在以下线性经验关系: $PAR = Q(0.53 - 0.073k)$, 因此非辐射站的 PAR 由此式计算。

根据上述计算绘制了 Q 和 PAR 分布图, 并对各省区各等值线间隔按其面积进行加权平均, 求出各省区和全国范围内平均单位面积上每项辐射的年总量, 再乘以相应省区的面积得到各省区和全国总量。计算中, 各省区面积采用中国百科年鉴(1982)的数字。计算结果表明, 我国国土范围内加权平均的 Q 和 PAR 的单位面积年总量分别为137千卡/厘米²和67千卡/厘米², 全国960万平方公里面积上每年可接收到的 Q 和 PAR 分别为 13×10^{18} 千卡和 6.4×10^{18} 千卡($PAR/Q \approx 0.49$), 按1吨标准煤含能700万千卡计算, 则我国国土上 Q 和 PAR 的每年总量分别约合20,000亿吨和10,000亿吨标准煤。加权平均的各省区的 Q 和 PAR 由表1给出。

二、净初级生产潜力的估计及其太阳能利用率

按照对环境因素的不同考虑分别讨论净初级生产潜力及太阳能利用率。

1. 光合作用的最大效率

陆地植物生产的有机物干重与植物利用太阳能, CO_2 、水和矿物质转化为 CH_2O 和 O_2 的效率有关。有许多因素影响这一效率, 其中很重要的一个就是光合作用的最大效率(或量子转换效率)。光合作用每还原1克分子 CO_2 所贮存自由能约为114千卡, 而这一过程一般需要8个光量子的能量(Bassham, 1977), 即8个爱因斯坦的能量, 每1爱因斯坦所含的能量 U 与波长 λ 有关, 可以表示为:

$$U = A_0 \times h \times c / \lambda = 28600 / \lambda$$

式中 U 的单位为千卡/爱因斯坦, A_0 为阿伏伽德罗常数, h 为普朗克常数, c 为光速, λ 为波长(nm)。绿色植物利用的光能波长为380—710nm, 这一波段内每一爱因斯坦光的能量平均约为54.28千卡(加权平均后的数值), 所以每还原1克分子 CO_2 为 CH_2O , 对 PAR 的最大利用率平均为 $E = 114 \div (54.28 \times 8) = 26.25\%$, 即光合作用的最大效率为26.25%。

应当指出, 光合作用的光量子需要数事实上有一定范围, 本文取8是其中数, 有的人取10, 如取10个量子, 则得 $E = 21\%$, 本文以下计算中仍按8计算, 取 $E = 26.25\%$ 。

2. 自然条件下净初级光能潜力 Y_p 及其太阳能利用率 R_p

Y_p 是指高产植物品种在不受温度、水分、养分、土壤、地形、病虫害和 CO_2 等的限制, 较好地利用实际的太阳光能资源条件下所能达到的最大生产力。为了得到 Y_p , 须对 PAR 进行以下修正和计算:

1) 植物群体对 PAR 的最大吸收率修正(A) 自然条件下的植物群体并不能全部利用 PAR , 能吸收多少, 主要决定于叶片冠层结构、反射能力和其他因子, Loomis等(1971)

估计 A 的上限为0.80,如按反射率12%(叶菲莫娃,1977)、非光合器官受光10%¹⁾计算,所得结果也约为0.80。显然,这样的高值只有当植物生长到叶片冠层完全覆盖地面(叶面积指数很大)时才能达到。

2) 叶面积指数修正($\bar{A}_L$)和生长率修正(G) 叶面积指数 LAI 为3—5时,群体的光能利用率最好²⁾,较小时需修正。Doorenbos等(1979)指出, LAI 为1、2、3、4和 ≥ 5 时修正值分别为0.4、0.6、0.8、0.96和1;龙斯玉(1983)提出,大多数农作物的 LAI 变化可按 LAI 为0、1、3和5的天数各占生长期的0.1、0.3、0.3和0.3;可得 $\bar{A}_L = 0.66$ 。考虑到育苗移栽和间作套种有利于提高生长期的 LAI ,因此取 $\bar{A}_L = 0.70$ 。

此外,自然条件下的植物不可能一直高速生长,不同的生长发育阶段有不同的生长率。作物生育中期一般有最大的生长率,而初期和晚期的生长率较小;幼龄林和中龄林生长率较大,成熟林较小;草地植物也有类似情况。Doorenbos等(1979)在讨论最高产量的农业生态区方法时估计作物全生育期的平均生长率约为最大生长率的50%,按此,本文取 $G = 50\%$ 。

3) 量子转换效率修正(E)取26.25%。

4) 植物呼吸修正(B)。

呼吸损耗视不同植物而异,一般作物的 B 取为40—50%(Doorenbos, 1979),作为潜力计算,一般取 $B = 33\%$ (Bassham, 1977; 牛文元, 1980)。

考虑了以上修正后,可将自然条件下的净初级光能潜力 Y_p 及其太阳能利用率 R_p 表示为:

$$Y_p = PAR \times A \times \bar{A}_L \times G \times E \times (1 - B) \div F \div (1 - C) \times 100 \quad (1)$$

$$R_p = A \times \bar{A}_L \times G \times E \times (1 - B) \quad (2)$$

式中 Y_p 的单位为吨/公顷·年; R_p 用百分数表示(相对于 PAR); PAR 用千卡/厘米²·年表示; $F = 4$ 千卡/克为植物有机干物质含热量; $C = 5\%$ 为一般植物物质含灰分率;其他符号意义同前。根据前面分析,取 $A = 0.80$, $\bar{A}_L = 0.70$, $G = 0.50$, $E = 26.25\%$, $B = 0.33$ 。将以上参数代入(1)、(2)式,得到

$$Y_p (\text{吨/公顷} \cdot \text{年}) = 1.3 PAR (\text{千卡/厘米}^2 \cdot \text{年}) \quad (3)$$

$$R_p \approx \begin{cases} 5\% & (\text{对 } PAR) \\ 2.5\% & (\text{对 } Q) \end{cases} \quad (4)$$

以上讨论的 Y_p 和 R_p 是比较接近自然群体生长条件的计算结果,如果考虑生长盛期最佳群体结构的短期生长率上限,则可以省去 $\bar{A}_L$ 和 G 修正,那时的光能利用率则为 $A \times E \times (1 - B) = 14\%$ (相对于 PAR),或约7%(相对于 Q)。

由于全国加权平均的 $PAR = 67$ 千卡/厘米²·年,因此相应的 $Y_p = 87$ 吨/公顷·年。各省区的情况见表1。

3. 自然条件下的净初级光温潜力 $Y_{p,i}$ 及其太阳能利用率 $R_{p,i}$

$Y_{p,i}$ 表示较好地利用当地的自然光、温资源,而水分等其他因素都处于最适状况时的潜在生产力,一般代表灌溉田和水田的潜在生物产量。

环境温度不但限定了生长季的长短,而且影响植物的生长速度,具体情况比较复杂。用

1) 黄秉维, 1978, 农业现代化概念。

2) 王天铎, 1978, 农业现代化概念。

一定时段内的平均温度表示这种影响(龙斯玉, 1983; 邓根云等, 1980)是建立定量关系的一种努力。另一种方法是用界限温度的间隔日数粗略表示温度或热量资源的影响¹。

联合国粮农组织专著(Doorenbos, 1979)提供了20余种主要作物的最高生产率与日间

表 1 Q、PAR和净初级生产力的省区分布

tab.1 Q, PAR and net primary productivity of each province and autonomous region in China

地 区	单 位 面 积 上 的 数 值							总 量			
	Q PAR		Y _p	Y _{p,c}	Y _{p,w}	Y _n	Y _a	Q PAR		Y _{p,w}	Y _n
	(千卡/厘米 ² ·年)		(吨干重/公顷·年)					(10 ¹⁷ 千卡/年)		(亿吨干重/年)	
北 京	134	66	86	55	36	9.5	10.6	0.23	0.11	0.60	0.15
天 津	126	62	81	53	32	9.0	6.7	0.14	0.07	0.37	0.10
河 北	135	65	85	53	35	9.0	6.1	2.5	1.2	6.5	1.7
山 西	132	64	83	49	30	8.0	4.8	2.1	1.0	4.8	1.3
内 蒙 古	138	66	86	43	17	4.0	2.3	16	7.8	20	4.7
辽 宁	125	62	81	47	33	11	8.2	1.8	0.9	4.8	1.6
吉 林	120	61	80	40	31	10	5.4	2.2	1.1	5.6	1.8
黑 龙 江	114	56	73	33	29	9.0	4.0	5.4	2.6	13	4.2
上 海	113	56	73	59	59	15	19.8	0.07	0.04	0.37	0.09
江 苏	121	60	78	58	56	15	15.0	1.2	0.62	5.7	1.5
浙 江	115	57	75	63	62	15	23.6	1.2	0.58	6.3	1.5
安 徽	120	59	77	58	57	16	9.9	1.7	0.83	7.9	2.2
福 建	115	57	75	67	67	17	15.3	1.4	0.68	8.0	2.0
江 西	112	56	73	63	62	18	15.6	1.9	0.93	10	3.0
山 东	131	63	83	55	45	11	8.7	2.0	0.97	6.9	1.7
河 南	120	59	77	54	48	12	8.1	2.0	0.99	8.0	2.0
湖 北	108	54	70	56	55	15	13.2	2.0	1.0	10	2.8
湖 南	103	52	68	57	56	15	19.6	2.2	1.1	12	3.2
广 东	119	59	77	72	71	23	13.9	2.5	1.3	15	4.9
广 西	109	55	72	63	63	17	11.4	2.6	1.3	15	4.0
西 川	122	61	80	47	43	13	12.8	7.0	3.5	25	7.4
贵 州	94	48	63	50	50	12	8.5	1.7	0.85	8.9	2.1
云 南	126	63	83	71	70	14	7.1	5.0	2.5	28	5.5
西 藏	170	80	104	43	18	5.0	4.8	21	9.8	22	6.1
陕 西	121	60	73	52	39	10	5.2	2.5	1.2	8.1	2.1
甘 肃	143	70	91	50	17	5.0	3.2	6.5	3.2	7.5	2.3
青 海	166	80	104	40	11	4.0	3.5	12	5.8	8.2	2.9
宁 夏	142	70	91	53	19	5.0	3.3	0.85	0.42	1.2	0.30
新 疆	145	72	94	49	4	0.9	3.6	23	12	7.0	1.4
台 湾	126	64	83	80	80	22		0.45	0.23	2.9	0.79
全 国	137	67	87	50	30	8.0	8.7	130	64	280	77

温度的对应数据, 并将这些作物分为4组, 分别用I_c、I_w、II_c和II_w表示。其中符号I和II分别代表C₃和C₄植物, 符号c和w分别代表喜凉和喜温作物。分析这些作物组的最高生产率与日间(即白天)温度的关系表明, 作物组I_c、I_w、II_c和II_w的最适温度分别为15—

1) 孙惠南, 1983, 自然地理若干问题讲座。

20℃、20—35℃、20—30℃和25—35℃。假如可以通过选择作物的方法适应环境温度,则一般作物的最高生产率与日间温度的关系曲线可用各作物组关系曲线的外包络线表示。外包络线表明,一般作物的最适温度范围约为20—35℃。考虑温度对产量的修正应当计算不同温度下的相对生产率,相对生产率是指外包络线各点的值(生产率)与最高值之比,计算表明,当日间温度分别为0、5、10、15、20、25、30、35、40和45℃时,相对生产率分别为0、0.08、0.23、0.69、1、1、1、1、0.69和0.08,因此温度修正函数可近似地写为:

$$f(T) = \begin{cases} 0.05T, & \text{当 } T < 20^\circ\text{C} \\ 1, & \text{当 } 20^\circ\text{C} \leq T < 35^\circ\text{C} \\ 3.92 - 0.0833T, & \text{当 } 35^\circ\text{C} \leq T < 45^\circ\text{C} \end{cases}$$

式中 T 为日间温度(℃)。

以上相对生产率与日间温度的关系表明,在最适温度(20—35℃)附近的15—20℃范围内相对生产率也相当高,或者说接近最高生产率。根据中国气候图集(1966)中我国年气温日较差的变化范围(8—16℃),可以认为日间温度一般比昼夜平均温度约高5℃,因此在日平均(昼夜平均)气温10—30℃范围内都可以认为是适宜温度。又考虑到我国各地月平均气温高于30℃的地点极少,因此可以认为昼夜平均气温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的日子都是适宜的。至于日平均气温在0—10℃之间的区域,相对生产率与温度近似地呈线性关系,为了简便,可以认为日平均气温在0—10℃之间的每一日数对产量的贡献大致相当于 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的每一日数对产量贡献的一半。这样就可以用日平均气温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的日数 N_{10} 和 $\geq 0^\circ\text{C}$ 的日数 N_0 联合表示温度的影响,把 Y_{pi} 和 R_{pi} 表示为:

$$Y_{pi} = Y_p \times \frac{(N_0 - N_{10}) \div 2 + N_{10}}{365} \quad (\text{吨/公顷} \cdot \text{年}) \quad (5)$$

$$R_{pi} = R_p \times \frac{(N_0 - N_{10}) \div 2 + N_{10}}{365} \quad (\%) \quad (6)$$

由(5)式计算的 Y_{pi} 分布图见图1,加权平均的各省区和全国的 Y_{pi} 值由表1给出,相应的太阳能利用率 R_{pi} 由表2给出。

由表1可知,按等值线间隔面积加权平均的 Y_{pi} ,南方省分高达70—80吨/公顷·年,东北、内蒙古和青藏高原各省区低至47—33吨/公顷·年(黑龙江省为33吨/公顷·年),其他省区居中,全国加权平均结果为50吨/公顷·年。这一分布特点反映了我国各地光能和热量资源对净初级生产力的定量影响。另由表2可知,相应于 Y_{pi} 的太阳能利用率 R_{pi} ,南方的浙江、湖南、广东、广西、云南、江西、福建、台湾等省区高达2.1—2.4%(相对于 Q),而内蒙古、黑龙江、西藏和青海等省区只有1.2—0.9%,全国加权平均结果为1.4%。

4. 净初级气候潜力 Y_{piw} 及其太阳能利用率 R_{piw}

Y_{piw} 代表较好地利用当地的光、热、水气候资源,而其他条件处于最适状况时的潜在生物产量。水分与产量的关系是复杂的,严格地讲,只有当水分供应充分满足植物在不同生育阶段对水分的需求时才能得到高产。Doorenbos等(1979)提出了不同作物不同生育期及全生育期的相对产量 Y_{ec}/Y_{pi} 与相对蒸散 ET_e/ET_m 之间的关系如下:

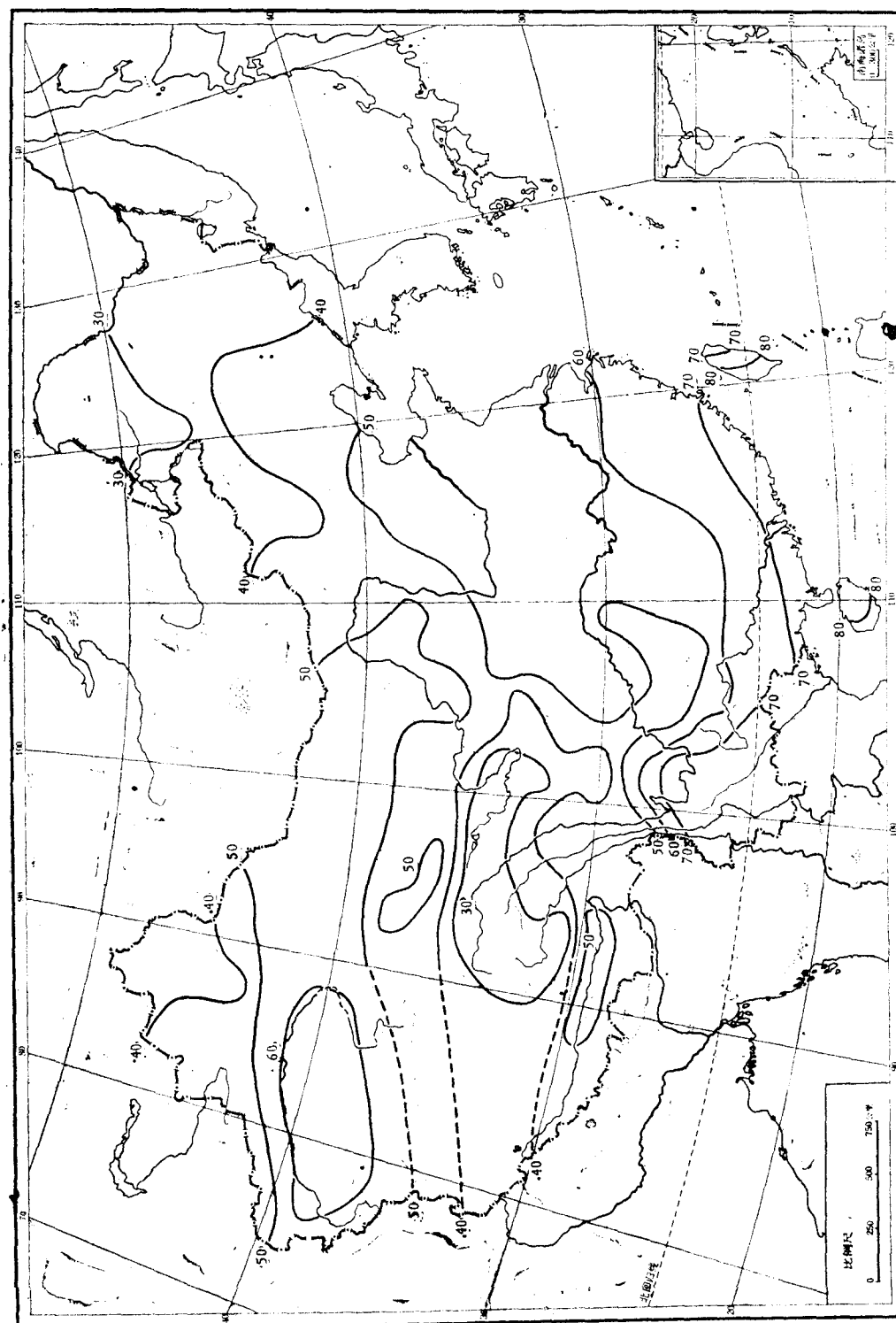


图1 Y_p 分布 (公吨干重/公顷·年)
Fig. 1 Y_p distribution (metric tons dry weight/ha⁻¹·year⁻¹)

表 2 太阳能利用率的省区分布
tab. 2 solar energy utilization efficiency of each province and autonomous region in China

地 区	相 对 于 PAR (%)					相 对 于 Q (%)				
	R_p	$R_{p,t}$	$R_{p,t,w}$	R_n	R_a	R_p	$R_{p,t}$	$R_{p,t,w}$	R_n	R_a
北 京	5	3.2	2.1	0.55	0.61	2.5	1.6	1.0	0.27	0.30
天 津	5	3.3	2.0	0.55	0.41	2.5	1.6	1.0	0.27	0.20
河 北	5	3.1	2.0	0.53	0.36	2.5	1.5	1.0	0.25	0.17
山 西	5	2.9	1.8	0.48	0.29	2.5	1.4	0.9	0.23	0.14
内 蒙 古	5	2.5	1.0	0.23	0.12	2.5	1.2	0.5	0.11	0.06
辽 宁	5	2.9	2.0	0.68	0.50	2.5	1.4	1.0	0.34	0.25
吉 林	5	2.5	2.0	0.62	0.34	2.5	1.3	1.0	0.32	0.17
黑 龙 江	5	2.3	2.0	0.61	0.27	2.5	1.1	1.0	0.30	0.13
上 海	5	4.0	4.0	1.02	1.34	2.5	2.0	2.0	0.51	0.67
江 苏	5	3.7	3.5	0.95	0.95	2.5	1.8	1.8	0.47	0.47
浙 江	5	4.2	4.1	1.00	1.57	2.5	2.1	2.1	0.50	0.78
安 徽	5	3.8	3.7	1.03	0.64	2.5	1.9	1.8	0.51	0.31
福 建	5	4.5	4.5	1.14	1.02	2.5	2.2	2.2	0.56	0.51
江 西	5	4.3	4.2	1.22	1.06	2.5	2.2	2.1	0.61	0.53
山 东	5	3.3	2.7	0.67	0.52	2.5	1.6	1.3	0.32	0.25
河 南	5	3.5	3.1	0.77	0.52	2.5	1.7	1.5	0.38	0.26
湖 北	5	3.9	3.9	1.06	0.93	2.5	2.0	1.9	0.53	0.46
湖 南	5	4.1	4.1	1.10	1.43	2.5	2.1	2.1	0.55	0.72
广 东	5	4.7	4.6	1.49	0.90	2.5	2.3	2.3	0.74	0.44
广 西	5	4.4	4.4	1.18	0.79	2.5	2.2	2.2	0.59	0.40
四 川	5	2.9	2.7	0.81	0.99	2.5	1.5	1.4	0.41	0.49
贵 州	5	4.0	4.0	0.95	0.67	2.5	2.0	2.0	0.49	0.34
云 南	5	4.3	4.3	0.85	0.43	2.5	2.2	2.1	0.42	0.21
西 藏	5	2.1	0.90	0.24	0.23	2.5	1.0	0.4	0.11	0.11
陕 西	5	3.3	2.5	0.64	0.33	2.5	1.6	1.2	0.31	0.16
甘 肃	5	2.7	0.90	0.27	0.18	2.5	1.3	0.44	0.13	0.09
青 海	5	1.9	0.54	0.19	0.19	2.5	0.9	0.26	0.09	0.09
宁 夏	5	2.9	1.0	0.27	0.18	2.5	1.4	0.51	0.13	0.09
新 疆	5	2.6	0.23	0.05	0.20	2.5	1.3	0.11	0.02	0.10
台 湾	5	4.8	4.8	1.31		2.5	2.4	2.4	0.67	
全 国	5	2.8	1.7	0.45	0.56	2.5	1.4	0.82	0.22	0.28

$$(1 - Y_{ac}/Y_{pt}) = K_y (1 - ET_a/ET_m)$$

式中 Y_{ac} 为实际产量, Y_{pt} 为光温潜力, ET_a 和 ET_m 为实际蒸散和最大蒸散, k_y 为经验系数, 依赖于不同作物类型和不同生育阶段。根据 Doorenbos 等 (1979) 提供的 25 种作物的经验资料, k_y 的变化范围为 0.7—1.25, 25 种作物的 k_y 平均值为 $0.997 \approx 1$, 因此我们在一般地评价气候潜力时取 $k_y = 1$ 。草地情况下的 ET_m 即为蒸发力 E_0 (或最大可能蒸发) (高国栋等, 1978); 农作物情况下, $ET_m = K_c \cdot E_0$, K_c 为作物系数, 根据 Doorenbos 等 (1979) 的工作, 水稻、小麦、玉米、大豆、高粱、棉花、甘蔗、甜菜等 8 种主要作物的 K_c 变化范围为 0.75—1.2, 作为一般潜力估算仍可取 1, 因此 ET_m 可用 E_0 代替。另外, 自然条件下的供水量即大气降水量 H , 虽然降水量的不均匀分布和地下水状况因地而异, 作物不同时期的需水总和

(用实际蒸散表示)并不能与年降水量简单地等同,但从潜力的观点考虑,如果能将降水进行人为的合理分配,并根据不同情况选择旱生与湿生植物,那么,对这种理想情况下的 $Y_{p,w}$ 估算而言,可粗略地用 H 代替 ET_a 。因此有:

$$Y_{p,w} = \begin{cases} Y_{p,t} & \text{当 } H > E_0 \\ Y_{p,t} \times (H \div E_0), & \text{当 } H \leq E_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$R_{p,w} = \begin{cases} R_{p,t} & \text{当 } H > E_0 \\ R_{p,t} \times (H \div E_0), & \text{当 } H \leq E_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中 E_0 和 H 的单位为毫米, E_0 的计算系根据布德科综合法(高国栋等,1978、1981)。由

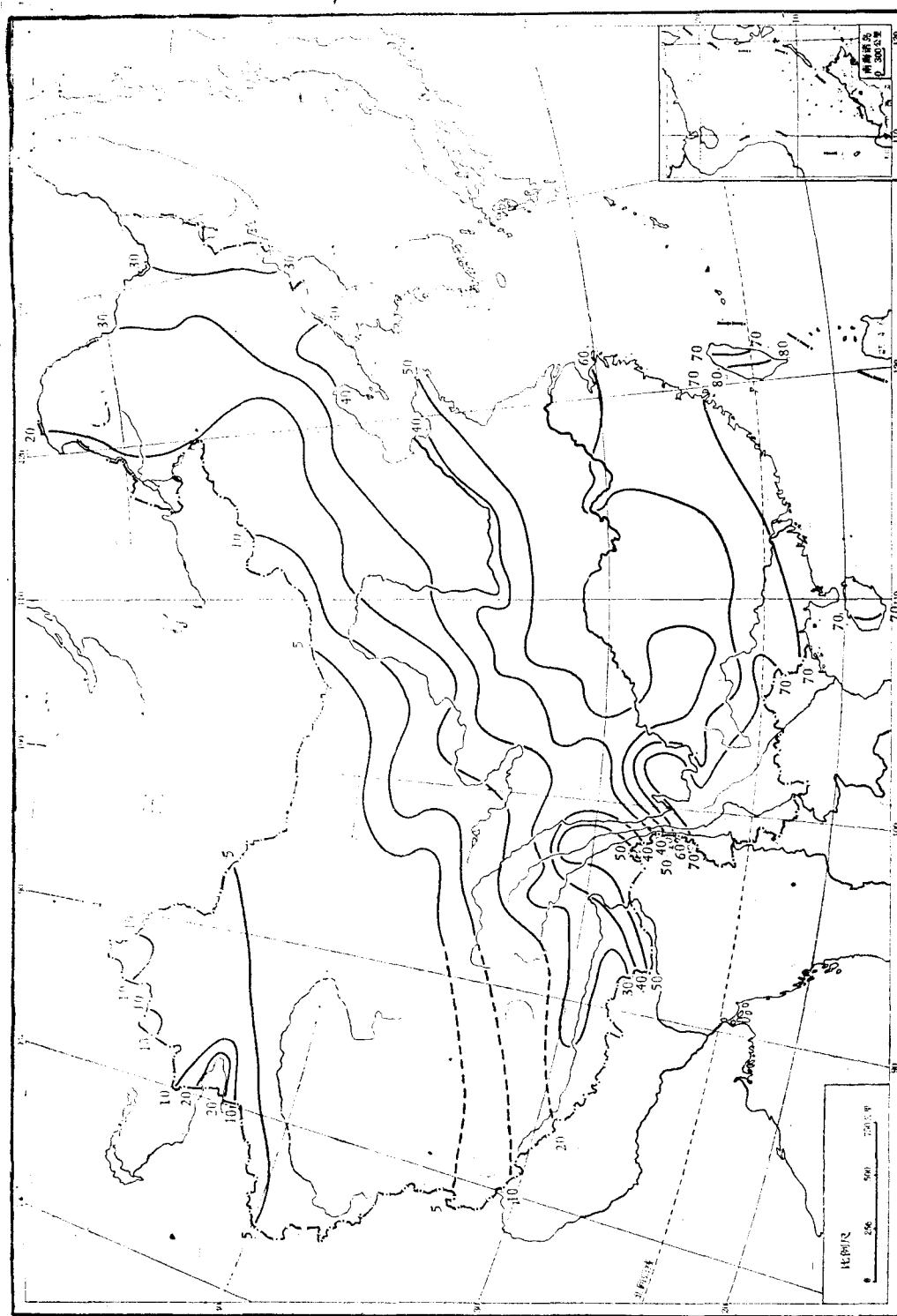
(7)式计算的净初级气候潜力 $Y_{p,w}$ 分布图见图2,加权平均的各省区及全国的 $Y_{p,w}$ 和相应的 $R_{p,w}$ 由表1和表2给出。

由表1可知,按等值线间隔面积加权平均的 $Y_{p,w}$,仍以台湾、广东、云南、福建、浙江等南方省区为最大,其数值(60—80吨/公顷·年)与相应省区的 $Y_{p,t}$ 数值几乎相同,这说明以上省区的水分资源丰富,对生产力限制不大。而缺乏水分的省区(如宁夏、西藏、内蒙古、甘肃) $Y_{p,w}$ 降到20吨/公顷·年以下,最低的青海和新疆分别只有11和4吨/公顷·年。其他省区居中,全国加权平均的 $Y_{p,w}$ 为30吨/公顷·年, $Y_{p,w}$ 的地域分布特征反映了我国各地光照、热量和水分资源对净初级生产力的综合定量影响。另由表2可知,相应于 $Y_{p,w}$ 的太阳能利用率 $R_{p,w}$,南方省区一般在1.8—2.4%左右(相对于 Q),而内蒙古、宁夏、甘肃、西藏等省区都在0.5%左右,最低的青海和新疆分别只有0.26%和0.11%。 $R_{p,w}$ 的全国加权平均值为0.82%(相对于 Q)。

按 $Y_{p,w} = 30$ 吨/公顷·年的单产水平计算,全国总量为280亿吨/年。由于我国土地资源中包含12.1%的沙漠戈壁、0.5%的永久积雪和冰川、4.5%的石山、和2.8%的内陆水域(中国科学院地理研究所,1983),如果第一项按新疆的 $Y_{p,w}$ 单产扣除,第二项按西藏,第三和第四项按全国的 $Y_{p,w}$ 单产扣除,那么扣除后的 $Y_{p,w}$ 全国总量为每年250亿吨。

应当指出,气候潜力的前提是其他条件处于最适状态,这很难在大范围内达到,因此250亿吨只是个理想数字。但是通过努力,有可能使小范围内的实际单产接近 $Y_{p,w}$ 。例如,长江流域亩产3,000斤(经济产量)的农田(合净初级产量48吨干重/公顷·年),已相当接近该地区的 $Y_{p,w}$ (60吨/公顷·年左右)。夏威夷的甘蔗有72—78吨/公顷·年的特高产记录(Woodwell, 1970),非常接近我国台湾省的 $Y_{p,w}$ 。

从上述计算过程可知, $Y_{p,w}$ 一般适合于农作物和草本植物。至于木本的树木森林,粗略地看,某些修正参数与农田情况相当接近;根据Larcher(1975)的工作,木本植物光合作用的最适温度和上下界温度大致都在草本植物的相应范围内;虽然森林的蒸腾一般大于农田,但灌溉田的蒸腾可能超过森林(森林生态学,1981)。因此对农作物的温度和水分修正大致适合于森林。所不同的主要是叶面积指数和呼吸修正,森林体形高大、枝叶繁茂、植物成分复杂、叶面积指数较大(可取 $\bar{A}_L \approx 0.9$);但由于森林中不进行光合生产的部分相对较大,因此呼吸损失率一般偏高。温带森林的呼吸损失一般达50—60%,热带雨林高达70—75%(森林生态学,1981;奥德姆,1974)。若取 $B = 50\%$,则森林的 $\bar{A}_L$ 和 B 修正为 $\bar{A}_L \times (1 - B) \approx 0.45$,与农田情况的 $0.7 \times 0.67 \approx 0.47$ 大致相当。因此 Y_p 、 $Y_{p,t}$ 和 $Y_{p,w}$ 分布图能

图 2 Y_p 分布 (公吨干重/公顷·年)fig. 2 Y_p distribution (metric tons dry weight/ha⁻¹·year⁻¹)

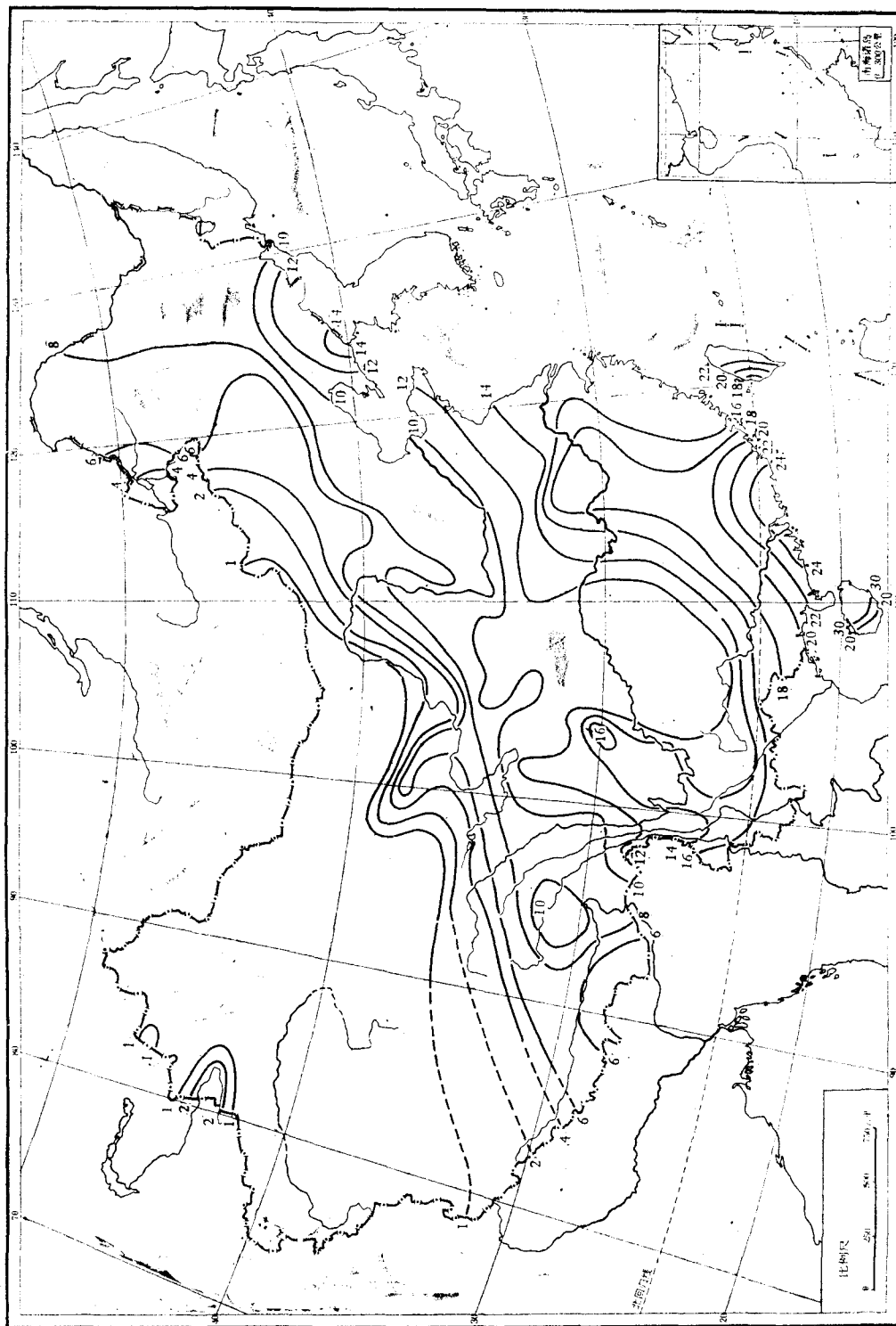


图 3 Y_n 分布 (公吨干重/公顷·年)
fig. 3 Y_n distribution (metric tons dry weight/ha $^{-1}$ ·year $^{-1}$)

够从气候上概括地反映我国陆生植物的相应生产潜力水平, $Y_{p, n}$ 还可以作为一个反映气候条件优劣程度的综合指标应用于农田草原生产力评价和森林立地条件评价。

三、自然植被生产力 Y_n 及其太阳能利用率 R_n

叶菲莫娃(1977)在总结前人工作的基础上,用植被年产量与辐射平衡 R 和辐射干燥指数 (R/Lr) 的关系曲线估计世界各大州(南极洲和格陵兰除外)的植被年产量为1,411亿吨(干重),亚洲为383亿吨。由于这种曲线图使用了植被产量的经验资料,因此应当比前述各种潜力更接近实际,但又由于这种植被产量的估算实际上只考虑气候因子,并且只代表未遭人类活动破坏的植被情况,因此还是一种潜在的可能产量。

叶菲莫娃的计算并未给出中国的详细情况和总量。本文用我国500余站的降水量资料和辐射平衡资料(高国栋等,1981),按叶菲莫娃的方法,对我国植被产量 Y_n 进行了详细估算,其分布图见图3,加权平均的各省区和全国的 Y_n 数值和总量由表1给出,相应的太阳能利用率 R_n 由表2给出。

由表1可知,我国自然植被单产最高的省分是广东和台湾,平均分别为23和22吨/公顷·年,广东和海南岛部分地区高达24—30吨/公顷·年;东南部和长江下游一带为15—20吨/公顷·年;黄淮海平原为8—14吨/公顷·年;内蒙、甘肃、宁夏、青海、西藏等省区都很小,一般为4—5吨/公顷·年;最小的新疆平均只有0.9吨/公顷·年。全国加权平均为7.9吨/公顷·年,略低于整个亚洲的平均水平(8.8吨/公顷·年)。

另外, Y_n 的全国总量为77亿吨/年,约占亚洲植被总产量的1/5。如前所述,由于我国的土地资源中包含不适合植被生长的部分(四项),如果第一项按新疆、第二项按西藏、第三和第四项按全国的 Y_n 单产扣除,那么扣除后的 Y_n 全国总量为70亿吨/年。

自然植被的太阳能利用率 R_n 由自然植被年产量 Y_n 所贮存的太阳能与入射到植被层的太阳辐射量 (PAR 或 Q) 的年总量的比值表示:

$$R_n = [Y_n \div 100 \times (1 - C) \times F] \div PAR \text{ (或 } Q) \quad (9)$$

式中各符号意义同前。这里用全年的而未用生长期的太阳辐射量,目的是为了更好地揭示热量资源对自然植被产量的影响和限制,也为了与其他生产力形式的太阳能利用率进行比较。根据前面 Y_n 、 PAR 和 Q 的计算结果,按(9)式计算了 R_n , 计算中, F 和 C 的取值同前,计算结果见表2。由表2可知,按等值线间隔面积加权平均的 R_n , 南方省区(江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广西、广东、贵州)的变化范围为0.47—0.74% (相对于 Q), 广东省最大,为0.74%,华北平原地区为0.23—0.44%,内蒙古、西藏、青海、甘肃、宁夏等省区低至0.1%左右,新疆最低,只有0.02%。 R_n 的全国加权平均值为0.22% (相对于 Q)。

四、我国主要农作物的净初级生产力 Y_a 及其太阳能利用率 R_a

农作物每年的生物产量(单产)一般可以代表其净初级生产力。根据1980—1982年中国农业年鉴提供的我国各省区主要农作物产量和复种指数资料,取1979—1981年三年平均产

量, 并扣除15%的水分, 再按经济系数0.4折合为每年的生物产量 Y_a (干重), 各省区 Y_a 的平均值 (非加权) 为8.7吨/公顷·年, 略高于自然植被产量 Y_n (8吨/公顷·年), 各省区的数值由表1给出。

相应于 Y_a 的太阳能利用率由下式计算:

$$R_a = [Y_a \div 100 \times (1 - C) \times F] \div PAR \quad (\text{或} Q) \quad (10)$$

式中各符号意义同前, 只是 PAR 和 Q 取农田所在地区的数值, 对照我国农作物和辐射分布图, 内蒙古、四川、西藏、甘肃、青海、新疆和全国耕地区的 Q 分别取142、100、160、135、145、140和120千卡/厘米²·年, 其余省区不变 (见表1)。由(10)式计算的各省区和全国 R_a 的平均结果 (非加权) 由表2列出。 R_a 的全国平均值为0.28% (相对于 Q), 相对于 PAR 的 R_a 为0.56%。

由表1、表2可知, 我国东南部各省区的 R_a 一般为0.3—0.6% (相对于 Q), 黄淮海平原地区为0.2—0.3%, 西藏、新疆、甘肃、青海、宁夏等省区都在0.1%左右, 内蒙古自治区为0.06%。浙江、湖南和上海的 R_a 都很高 (分别为0.78%、0.72%和0.67%), 主要原因是这些地区的复种指数高 (分别为2.55、2.34和2.15), 复种指数的统计精度虽然有些问题, 但对于把按播种面积的单产转换为单位耕地面积的年产量的粗略估计而言, 还是可以使用的。

自然植被产量 Y_n 的估计主要依据气候因子, 而实际产量 Y_a 受所有因子的影响, 由于 Y_a 和 R_a 主要针对农田计算, 而且各省区耕地面积大小和分布各有不同, 因此各省区 R_a 和 R_n 的相对大小 (R_a/R_n) 并不一致。

五、结果分析讨论

从各种净初级生产力的全国加权平均结果 (见表1末行) 可以得到以下结论: (1) 由于我国有些地区热量资源不足, 平均使全国的潜在产量降低43% (相对于 Y_p , 下同)。

(2) 由于有些地区水分资源不足 (不包括分配利用不当), 平均使产量降低23%。(3) 以上两项合计损失产量66%。(4) 自然植被单产 Y_n 与当今我国主要农作物的单产 (净初级单产) Y_a 相当接近, 分别约为光能潜力的9%和10%, 因此, 由于土壤、肥料、病虫害和水分分配利用不当等其他所有因素又使产量降低25%左右。(5) 考虑了我国实际的光、温、水气候条件影响的气候潜力 $Y_{p,w}$ 约为自然植被生产力 Y_n 的3.8倍, 约为 Y_a 的3.4倍, 这样的潜力水平是可以通过努力在小范围内达到的。相应的太阳能利用率的对比也可得到类似结论。

当今约占我国国土面积10%的农田每年的生物产量约为8.5亿吨 (干重)。从国土面积中扣除20%左右不适合植物生长的部分后, 在其余80%的国土上如果布满植被, 并不遭破坏, 那么每年自然植被产量的估计值为70亿吨干重, 生产力水平与农田相当。

参 考 文 献

- 中国百科年鉴编委会 1983 中国百科年鉴 (1982)。中国大百科全书出版社上海分社。
- 中国农业年鉴编委会 1981、1982、1983 中国农业年鉴 (1980、1981、1982)。农业出版社。
- 中国科学院地理研究所 1983 中国农业自然条件和农业自然资源。第82—90页。农业出版社。
- 牛文元 1980 作物最大生产力。自然资源 (3):44—56。
- 邓根云、冯雪华 1980 我国光温资源与气候生产潜力。自然资源 (4):11—16。
- 龙斯玉 1983 江苏省农业气候生产潜力的探讨。农业气象科学 (1):1—13。
- 叶菲莫娃, H.A. (王炳忠译) 1977 植被产量的辐射因子。第157—202页。气象出版社。
- 东北林学院主编 1981 森林生态学。第16—148页。中国林业出版社。
- 朱志辉 1984 我国太阳能分布的非线性回归模式。地理研究 3 (3):76—82。
- 高国栋等 1978 我国最大可能蒸发量的计算和分布。地理学报 33 (2):102—111。
- 高国栋、陆渝蓉 1981 中国物理气候图集。农业出版社。
- 奥德姆, E.P. (孙儒泳等译) 1974 生态学基础, 第1—82页。人民教育出版社。
- Bassham, J.A. 1977 Increasing crop production through more controlled photosynthesis. *Science* 197:630—640.
- Doorenbos, J. et al. 1979 Yield response to water. FAO of The United Nations, Rome, P. 1—80.
- Hall, D.O. and E.J. DaSilva. 1983 Photosynthesis: A bio-solar tool for development. *Nature and Resources* 19 (2):2—9.
- Larcher, W. 1975 Physiological plant ecology. 1—100 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Loomis, R.S. and A.E. Hall 1971 Agricultural productivity. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 22:431—470.
- Woodwell, G.M. 1970 The energy cycle of the Biosphere. *Scientific American* 223 (3):64—74.

SOLAR ENERGY UTILIZATION EFFICIENCY OF THE LAND PLANTS IN CHINA

Zhu Zhihui Zhang Fuchun

(Institute of Geography, Academia Sinica)

In this paper, the net primary productivity for land plants in China under different cases and the relevant utilization efficiency to solar energy are analyzed.

Calculations indicate that the yearly sum of the global solar radiation Q and the photosynthetic active radiation (PAR) incident on the 9.6 million square kilometers of the land in China are respectively 13×10^{18} kcal and 6.4×10^{18} kcal, or about 2×10^{12} and 1×10^{12} metric tons of standard coal respectively. The yearly sum of the climatic potential net primary productivity, $Y_{p, w}$, which makes full use of PAR , temperature and precipitation when other conditions are optimum, is about 250×10^8 metric tons (dry weight). The yearly total of the estimated natural vegetation productivity Y_n on the same land, which is dependent upon climatic factors, is about 70×10^8 metric tons (dry weight).

With regard to the weighted average of the net primary productivity in the whole land, the sunlight energy potential productivity, Y_p , dependent on PAR when other conditions are optimum, is $87 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$; the sunlight-temperature potential productivity, $Y_{p, t}$, dependent on PAR and temperature when other conditions are optimum, is $50 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$; the climatic potential productivity,

Y_{ptw} , is $30 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$; the potential natural vegetation productivity, Y_n , is $8 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$; the net primary productivity of the major crops at present, Y_a , is $8.7 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$. The relevant values of each province and autonomous region in the country are given in the table 1 of this paper.

According to the weighted average of Q and PAR in the whole country, if $Q = 100\%$, then $PAR \approx 49\%$; the upper limit of the solar energy utilization efficiency for high-producing varieties of plants with optimum leaf canopy and during the maximum growing season is 7% ; the solar energy utilization efficiency R_p , R_{pt} , R_{ptw} , R_n and R_a ——relevant to Y_p , Y_{pt} , Y_{ptw} , Y_n and Y_a ——are respectively 2.5% , 1.4% , 0.82% , 0.22% , and 0.28% of Q (annual sum). The relevant values of each province and autonomous region are given in the table 2 of this paper.