

# 长武塬区光合有效辐射的基本特征及气候学计算

韩晓阳<sup>1</sup>, 刘文兆<sup>2</sup>, 朱元骏<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100)

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 利用长武农业生态试验站 2010 年气象观测资料, 分析了长武塬区光合有效辐射及其占太阳总辐射比例系数的日变化、季节变化特征和影响因素。结果表明: 就日变化过程而言, 光合有效辐射和总辐射趋势一致, 晴天呈单峰型, 起伏平滑; 阴天的形状则不稳定, 最大值出现在 12:30~15:00 之间。光合有效辐射具有明显的季节变化特征, 春夏较大, 秋季次之, 冬季最小, 从春到冬其平均日总量分别为 6.32、7.23、5.63 MJ/m<sup>2</sup> 和 3.58 MJ/m<sup>2</sup>。光合有效辐射系数阴天大, 晴天小; 就月平均值而论, 6 月份最大, 为 0.423, 1 月份最小, 为 0.327。根据观测数据, 论文给出了适合该地区的光合有效辐射计算的的经验模型。

**关键词:** 长武塬区; 光合有效辐射; 太阳总辐射; 气候学计算

中图分类号: P422.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-7601(2012)04-0166-06

太阳辐射能是地表最基本、最重要的能源。光合有效辐射 (Photosynthetically Active Radiation, PAR) 则是太阳辐射能中可以被绿色植物用来进行光合作用的能量, 波长在 400~700 nm 之间。PAR 作为一种气候资源, 是评价植物光合潜力、潜在产量的重要科学依据<sup>[1]</sup>, 是植物生长、土壤固碳等模拟研究中不可缺少的基础数据。在 PAR 的估算方法及光合有效辐射系数  $\eta$  (光合有效辐射占总辐射的比例) 的变化特征及影响因子的分析方面, 国内外已做不少工作。周允华等<sup>[2]</sup> 在研究 PAR 与其他气象要素关系的基础上, 提出了利用太阳总辐射估算 PAR 的气候学公式。张宪洲、刘新安、张运林、白建辉等<sup>[3-6]</sup> 分别对青藏高原、辽宁、太湖和内蒙古地区 PAR 的变化特征进行了分析, 并分别提出了适用于当地的 PAR 经验计算公式。然而, 这些研究主要集中在我国华北、淮河流域及青藏高原的部分地区, 秦岭及黄土高原地区相关研究开展较早, 但研究区域有限<sup>[7]</sup>。黄土高原南部高塬沟壑区光、热、水和土壤资源丰富, 农业发达, 是黄土高原的主要农业区。该区域地形复杂, 气候资源分异明显, PAR 的变化特征及计算方法对于区域作物潜力的估算具有一定价值。基于此, 本研究通过分析中国科学院长武黄土高原农业生态试验站辐射观测资料, 探讨研究区域光合有效辐射的基本特征, 并试图建立相应的 PAR 计算的的经验公式。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于黄土高原南部黄土塬区的长武农

业生态试验站 (35.14°N, 107.41°E), 海拔 1 220 m, 属暖温带大陆性季风气候。1 月平均气温 -5.1℃, 7 月平均气温 22.4℃, 年均气温 9.1℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  年积温 2 994℃, 年日照时数 2 218 h, 年均降水量 584 mm, 无霜期 171 d, 地下水埋深 50~80 m; 区域地貌类型为黄土高原沟壑区, 塬面和沟壑两大地貌单元各占 35% 和 65%; 该区地带性土壤为质地均匀疏松的黑垆土。试验观测场为长武农业生态试验站内标准气象观测场。

### 1.2 研究方法

采用定位观测的方式, 依托试验站气象观测场内辐射观测仪器对辐射进行连续观测。其中, 光合有效辐射 (PAR) 的观测采用美国 Li-COR 公司生产的 Li-190SB 硅光电探测器, 观测波长范围 400~700 nm, 仪器灵敏度为 5  $\mu\text{A}/1000$  光子量子密度 ( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )。总辐射的观测采用 Kipp & Zonen CM11 总辐射传感器, 观测波长范围 305~2 800 nm, 仪器测定范围和精度分别为 0~4 000 W/m<sup>2</sup> 和 1 W/m<sup>2</sup>, 逐日太阳辐射总量单位为 MJ/(m<sup>2</sup>·d)。辐射数据由 Campbell 数据采集器存储, 计算机定时下载。此外, 每日对温湿度、云、天气状况等进行观测和记录。

光子量子通量密度和辐射通量密度两种度量系统之间存在一个量子转换系数。在本研究中转换系数采用周允华等的研究结果, 取 4.55  $\mu\text{mol}/\text{J}^{[2]}$ 。本文采用的数据为长武农业生态试验站 2010 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日的 PAR 和总辐射 (Eg) 的观测数据, 数据序列完整。

收稿日期: 2011-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171033)

作者简介: 韩晓阳 (1987-), 男, 山东聊城人, 在读硕士, 主要研究方向为农业生态学。E-mail: hanxiaoyang1987@126.com

通讯作者: 刘文兆 (1960-), 男, 陕西乾县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事水文生态与流域管理研究。E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

## 2 结果与分析

### 2.1 PAR 的日变化

PAR 的日变化特征与天气状况有关, 在本研究

中选取 2010 年春夏秋冬四季的代表月(分别为 4 月、7 月、10 月和 1 月)内的典型晴天日(云量不足 2 成)和典型阴天日(云量多于 8 成)的 PAR 和总辐射 ( $E_g$ ) 数据进行分析, 结果如图 1。

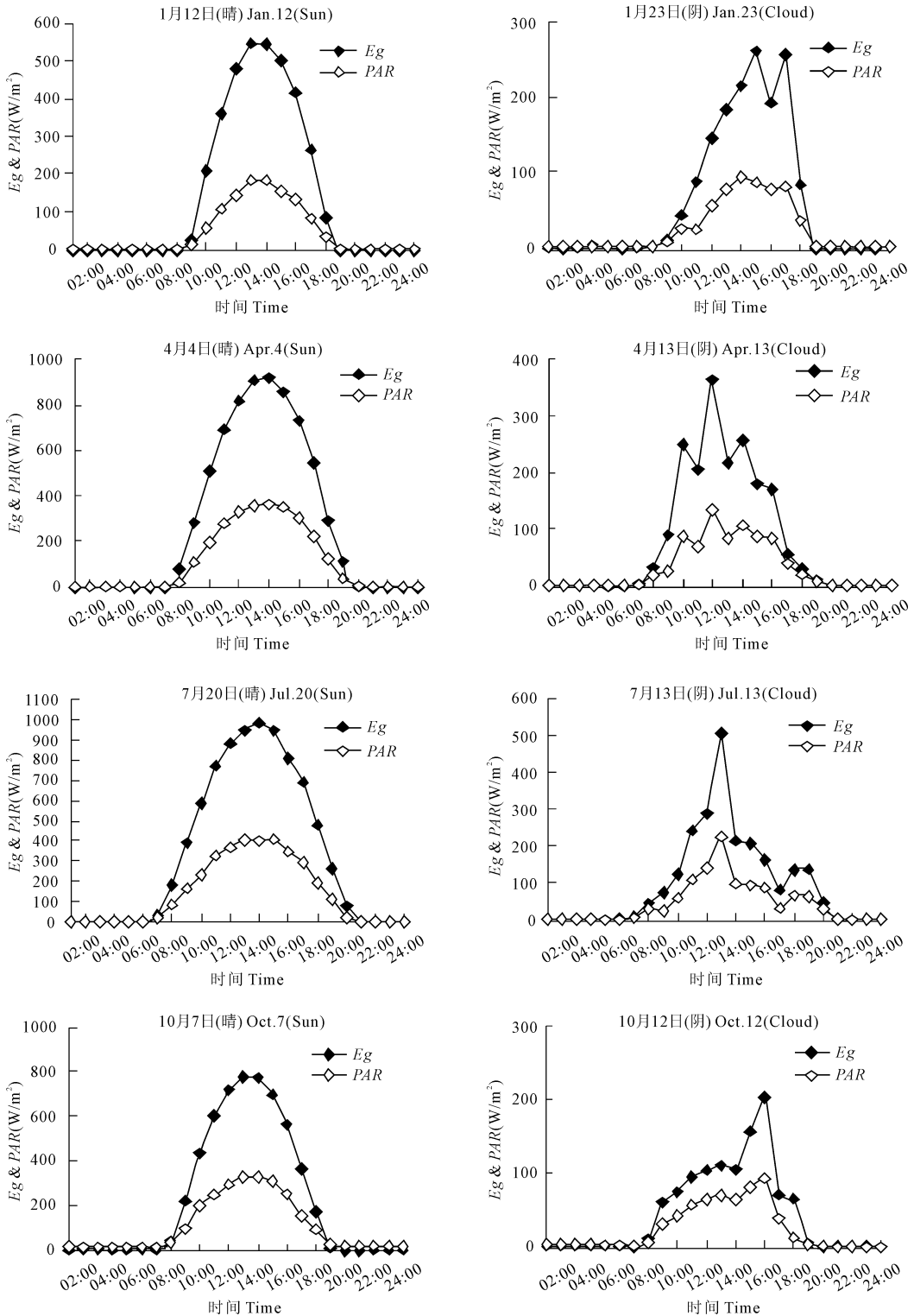


图 1 不同季节典型晴天日(左)和典型阴天日(右)太阳总辐射( $E_g$ )和光合有效辐射( $PAR$ )的变化趋势

Fig. 1 Change trends of total solar radiation( $E_g$ ) and  $PAR$  on typical days in different seasons

从图 1 可以看出: (1) 不同季节的典型晴日的  $E_g$  和  $PAR$  变化均比较稳定, 表现为早晚较小, 中午

较大,呈比较平滑的单峰曲线。晴日 PAR 和  $E_g$  的最大值均出现在 12:30~15:00 之间。阴天日  $E_g$  和 PAR 的变化则比较复杂,相对不稳定且波动比较明显。这与阴天的云量、天气状况以及大气透明度有关;(2) 典型晴日的  $E_g$  和 PAR 值明显大于阴天时的相应值,表明天空云量、水汽含量以及大气透明度对  $E_g$  和 PAR 的影响不可忽视;(3) 晴天和阴天两种情况下,  $E_g$  和 PAR 的变化趋势都比较一致,且其变化与太阳高度角的变化密切相关。对于四个季节来说,PAR 的日最大值出现在夏季,春、秋季次之,冬季最小。

## 2.2 PAR 的季节变化

图 2 为长武塬区 2010 年 1—12 月份的  $E_g$  和 PAR 平均日总量的月平均值变化曲线。2010 年该地区年总辐射量为  $5\,088.6\text{ MJ/m}^2$ ; PAR 的年总量为  $2\,060.3\text{ MJ/m}^2$ , 平均日总量  $5.64\text{ MJ/m}^2$ 。春夏秋冬四季的 PAR 日平均总量分别为  $6.32\text{ MJ/m}^2$ ,  $7.23\text{ MJ/m}^2$ ,  $5.63\text{ MJ/m}^2$  和  $3.58\text{ MJ/m}^2$ 。夏季 PAR 日平均总量最大,冬季最小。

从图 2 中还可以看出,PAR 与  $E_g$  日总量的月平均值变化趋势基本一致,而且都在 6 月份达到最大值,6 月份以后开始下降,1 月份出现最小值。

表 1 2010 年各月光合有效辐射系数( $\eta$ )的变化

Table 1 Monthly variation of the ratio of PAR to total solar radiation in 2010

项目 Item	月份 Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\eta$	0.327	0.342	0.376	0.397	0.405	0.423	0.421	0.420	0.404	0.407	0.390	0.388

对各月典型晴天和典型阴天条件下  $\eta$  进行比较,并分析了冬夏两季典型晴天和典型阴天条件下  $\eta$  的

日变化(见表 2 和图 3)。晴天  $\eta$  值明显小于阴天,两者的季节变化与  $\eta$  月平均的季节变化规律一致。

表 2 各月晴天和阴天条件下光合有效辐射系数( $\eta$ )

Table 2 The ratio of PAR to global radiation in clear day and cloudy day each month

项目 Items	月份 Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
晴天 Clear day	0.318	0.306	0.319	0.406	0.401	0.420	0.423	0.414	0.441	0.485	0.516	0.371
阴天 Cloudy day	0.353	0.432	0.363	0.459	0.485	0.465	0.521	0.365	0.495	0.709	0.475	0.457

## 2.4 PAR 的气候学计算

PAR 的气候学计算关键在于  $\eta$  的确定。国内外学者对  $\eta$  进行了较多研究,但由于仪器以及测定波段差别等方面的原因,  $\eta$  值有较大差异。Moon 最早提出在  $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$  波段内,  $\eta=0.44^{[10]}$ 。之后, McCree 又分晴天和阴天对  $\eta$  加以讨论,认为晴天  $\eta$  在  $0.47\sim 0.52$  之间,阴天则增至为  $0.50\sim 0.58^{[11]}$ 。我国学者对  $\eta$  也有研究,如黄秉维教授在《现代自

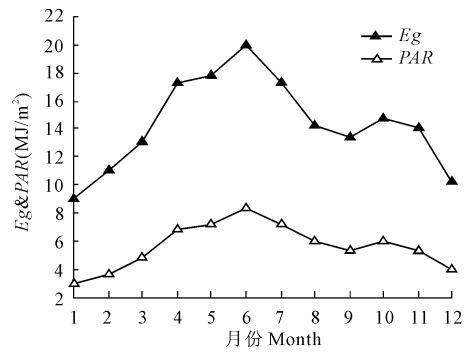


图 2 总辐射( $E_g$ )和 PAR 的年变化

Fig. 2 Variation of mean total diurnal quantities of  $E_g$  and PAR in each month of 2010

## 2.3 PAR 占总辐射比例的变化特征

大量观测表明,光合有效辐射系数( $\eta$ )受到多种因素(如水汽、散射因子或气溶胶、霾、云、雨、雪和沙尘等)的影响,并有明显的时间和空间变化<sup>[8]</sup>。

表 1 为 2010 年各月光合有效辐射月平均日总量占太阳总辐射比例系数( $\eta$ )的月平均值。从该表可以看出,光合有效辐射系数一年中的变化在  $0.327\sim 0.423$  之间,其中夏秋较大。一年中月平均的最大值出现在 6 月,为  $0.423$ ;最小值出现在 1 月份,为  $0.327$ 。

然地理》<sup>[12]</sup>中取  $\eta=0.47$  来计算作(植)物光合潜力;周允华等<sup>[1]</sup>对  $\eta$  有过较详细的阐述,根据其测量和研究结果认为,  $\eta$  是  $E^*$  的函数,并得出如下经验关系式:

$$\eta_Q = 0.384 + 0.0531g E^* \quad (1)$$

季国良等<sup>[13]</sup>得出张掖地区的经验计算公式为

$$\eta_Q = 0.404 + 0.0511g E^* \quad (2)$$

式中,  $E^*$  为经过气压(高度)订正后得水汽压,可表

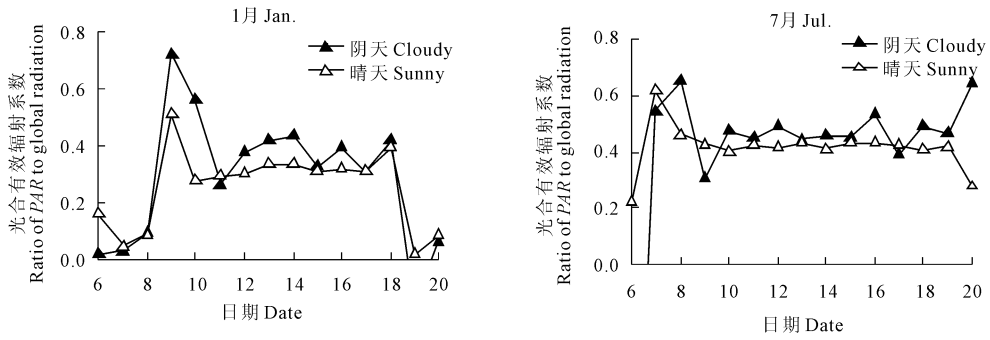


图 3 1 月份和 7 月份典型晴天和典型阴天光合有效辐射系数的变化

Fig. 3 Variation of the ratio of PAR to  $E_g$  in typical days of January and July

示为:

$$E^* = \frac{P_0 \times e}{P} \quad (3)$$

其中,  $P_0$  和  $P$  分别为海平面及测站的旬平均气压;  $e$  为旬平均水汽压。

根据上述思路, 利用长武试验站 2010 年气象资料中温度  $T$ 、相对湿度  $RH$ 、大气压  $P$ 、海平面大气压  $P_0$  等数据, 根据公式(4) 计算旬平均饱和水汽压:

$$E = E_0 10^{\frac{aT}{b+T}} \quad (4)$$

式中,  $E_0 = 6.11 \text{ hPa}$ , 是  $0^\circ\text{C}$  时的饱和水汽压;  $T$  是温度, 单位为  $^\circ\text{C}$ ; 对于水面  $a = 7.63$ ,  $b = 241.9$ , 对于冰面,  $a = 9.5$ ,  $b = 265.5^{[13]}$ 。

再通过公式(5) 计算旬平均水汽压  $e$ :

$$e = \frac{Ef}{100} \quad (5)$$

其中  $f$  为旬平均相对湿度。

由此算出经大气压修正后的水汽压  $E^*$  的旬平均值变化范围为  $2.76 \sim 23.61 \text{ hPa}$ ,  $\eta$  的旬平均值变化范围为  $0.317 \sim 0.449$ , 将二者进行一元线性回归, 得到适合长武塬区的光合有效辐射计算公式:

$$Q_{PAR} = \eta \times Q_{Eg} \quad (6)$$

$$\eta = 0.286 + 0.105g E^* \quad (7)$$

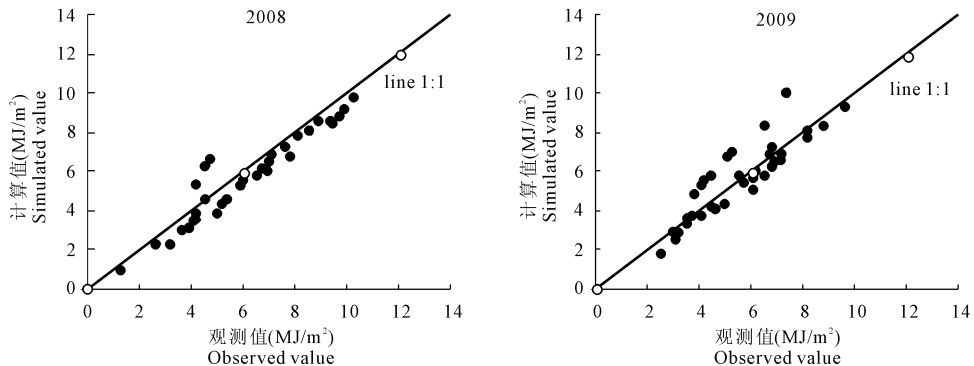


图 4 观测的 PAR 旬平均值与计算值对比

Fig. 4 Comparison between simulated and observed PAR value in ten-day period

该经验关系式的相关系数为  $0.863$ ,  $R^2$  为  $0.745$ , 标准误差估计 (SEE) 为  $0.0216$ , 均方根误差 (RMSE)  $0.0005$ , 二者在  $0.01$  水平显著相关, 表明该公式拟合优度较高。

为了进一步对该经验公式进行验证, 分别选用长武试验站 2008、2009 年各月的 PAR 旬平均值与公式计算值进行分析。

用 SIGMAPLOT 对 2008、2009 年各月实际观测的 PAR 旬平均值与公式计算值做 1:1 趋势分析, 如图 4, 2008 年实际观测的 PAR 旬平均值在  $1.26 \sim 10.23 \text{ MJ/m}^2$  之间, 计算值在  $1.03 \sim 9.93 \text{ MJ/m}^2$  之间; 2009 年实际观测的 PAR 旬平均值在  $2.44 \sim 9.57 \text{ MJ/m}^2$  之间, 计算值在  $1.86 \sim 10.18 \text{ MJ/m}^2$  之间。两年旬平均值的计算结果与实际观测值的均方根误差 (RMSE) 分别为  $0.441 \text{ MJ/m}^2$  和  $0.983 \text{ MJ/m}^2$ , 平均相对误差分别为  $6.60\%$  和  $3.66\%$ 。 $T$  检验得两年数据检验  $P$  值分别为  $0.626$  和  $0.436$ , 远大于  $0.05$  水平, 表明 PAR 实际观测值和公式计算值无显著差异, 两年的数据与 1:1 线分布也体现了观测值和计算值的接近程度, 说明该经验公式代表性较好, 能够用于长武塬区 PAR 的计算。

## 4 结论与讨论

1) 长武塬区 2010 年辐射总量为 5 088.6 MJ/m<sup>2</sup>, 光合有效辐射年总量为 2 060.3 MJ/m<sup>2</sup>, 年平均日总量为 5.64 MJ/m<sup>2</sup>, 春夏秋冬四季的 PAR 平均日总量分别为 6.32、7.23、5.63 MJ/m<sup>2</sup> 和 3.58 MJ/m<sup>2</sup>, 夏季 PAR 平均日总量最大, 冬季最小。

该地区 2010 年辐射总量与赵军等<sup>[9]</sup>研究的黄土高原的总辐射数据一致; 与其它地区相比, 该地区 PAR 年总量明显小于张掖(2 804.38 MJ/m<sup>2</sup>)<sup>[13]</sup>、临泽(2 585.25 MJ/m<sup>2</sup>)<sup>[14]</sup>以及青藏高原的西大滩地区(2 913.6 MJ/m<sup>2</sup>)<sup>[15]</sup>, 但大于太湖(1 616.95 MJ/m<sup>2</sup>)<sup>[6]</sup>和淮河流域(1 970.8 MJ/m<sup>2</sup>)<sup>[16]</sup>, 这主要是由各地气候条件、地理特性(经纬度、海拔)、云量、大气气溶胶及水汽等因素差异造成的, 该规律也符合陈明荣早期研究结论<sup>[7]</sup>。

2) 不同季节的典型晴日的总辐射  $E_g$  和光合有效辐射 PAR 变化比较一致: 早晚较小, 中午较大, 呈比较平滑的单峰曲线; 而阴天日  $E_g$  和 PAR 的变化则比较复杂, 相对不稳定且波动比较明显; 最大值均出现在 12:30~15:00 之间。

3) PAR 与  $E_g$  的月平均日总量值的变化趋势基本一致, 都具有明显的季节变化特征, 而且都在 6 月份达到最大值, 6 月份以后开始下降, 这主要由于进入夏秋季节, 阴雨天气增多, 大气中含水量增多; 1 月份出现最小值。

4) 光合有效辐射系数阴天大, 晴天小; 就月平均值而论, 6 月份最大, 为 0.423, 1 月份最小, 为 0.327。

这是因为随着天空云量增多, 空气分子和气溶胶粒子对散射的贡献率相对减小, 并且对红外长波吸收较多, 从而导致  $\eta$  随云量的增加而增大。4、5、9 月份出现相对低值是由于这几个月天气较好, 降水量和云量都不大, 空气湿度低, 云和水汽对红外辐射等长波的吸收有所降低, 致使光合有效辐射的月平均日总量占太阳总辐射的月平均日总量的比例降低。

该地区夏季云量较多, 大气中水汽含量相对丰富, 水汽在红外波段有较强的吸收消光作用<sup>[17]</sup>, 其对太阳总辐射的削弱作用明显大于对 PAR 的衰减。

5) 利用 2010 年气象数据, 将大气压修正的水

汽压和光合有效辐射系数拟合, 得到光合有效辐射经验计算公式为  $\eta = 0.286 + 1.05 \lg E^*$ ; 利用 2008、2009 年相应数据对该经验公式进行检验, 2008 年 10 月和 2009 年 1、2、4 月实测值与计算值相差较大, 其余各月的相对误差都较小, 经过对上述几个月的天气状况和云量进行分析发现, 这种现象与天气状况和空气混浊程度有关, 但总体来说该公式具有较高代表性, 能够用于长武塬区的光合有效辐射的计算, 并为同类型区的相关研究提供参考。

### 参考文献:

- [1] 周允华, 项月琴, 单福芝. 光合有效辐射 (PAR) 的气候学研究 [J]. 气象学报, 1984, 42(4): 387-397.
- [2] 周允华, 项月琴, 栾禄凯. 光合有效量子通量密度的气候学计算 [J]. 气象学报, 1996, 54(4): 447-455.
- [3] Zhang X Z, Zhang Y G, Zhou Y H. Measuring and modelling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during April-October [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 102(2/3): 207-212.
- [4] 刘新安, 范辽生, 王艳华, 等. 辽宁省太阳辐射的计算方法及其分布特征 [J]. 资源科学, 2002, 24(1): 82-87.
- [5] 张运林, 秦伯强. 太湖地区光合有效辐射 (PAR) 的基本特征及其气候学计算 [J]. 太阳能学报, 2002, 23(1): 118-123.
- [6] 白建辉, 王庚辰. 内蒙古草原光合有效辐射的计算方法 [J]. 环境科学研究, 2004, 17(6): 15-18.
- [7] 陈明荣. 秦岭的气候与农业 [M]. 西安: 陕西人民出版社, 1983.
- [8] 白建辉. 华北地区光合有效辐射的计算方法研究 [J]. 气象与环境学报, 2009, 25(2): 1-8.
- [9] 赵军, 李旺平, 李飞. 黄土高原太阳总辐射气候学计算及特征分析 [J]. 干旱区研究, 2008, 25(1): 54-58.
- [10] Moon P. Proposed standard solar radiation curves for engineering use [J]. Journal of the Franklin Institute, 1940, 230(5): 583-617.
- [11] McCree K J. A solarimeter for measuring photosynthetically active radiation [J]. Agricultural Meteorology, 1966, 3(5-6): 353-366.
- [12] 黄秉维, 郑度, 赵名茶. 现代自然地理 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 56-69.
- [13] 季国良, 马晓燕, 邹基玲, 等. 张掖地区的光合有效辐射特征 [J]. 高原气象, 1993, 12(2): 141-146.
- [14] 周淑贞. 气象学与气候学 [M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 61-62.
- [15] 孙琳婵, 赵林, 李韧, 等. 西大滩地区光合有效辐射的基本特征 [J]. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1136-1143.
- [16] 童应祥, 王东, 田红, 等. 淮河流域农田光合有效辐射 (PAR) 的基本特征 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(23): 331-335.
- [17] 余予, 陈洪滨, 夏祥鳌. 香河地区光合有效辐射观测分析研究 [J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1094-1100.

## Basic characteristics of photosynthetically active radiation and its climatological calculation on Changwu tableland

HAN Xiao-yang<sup>1</sup>, LIU Wei-zhao<sup>2</sup>, ZHU Yuan-jun<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The diurnal and seasonal variation characteristics of the PAR and the ratio of the PAR to global radiation were studied by using the meteorological data from the Changwu Eco-agricultural Experimental Station in 2010. The results indicate that the diurnal variations of the PAR and global radiation on typical days have the same trend. The curve for sunny day shows a smooth unimodal feature, while the curve for cloudy day is not stable. The maximum values on both curves appear between 12:30~15:00. The PAR is characterized by the obvious seasonal variation and the mean total diurnal quantities of the PAR for the seasons are 6.32, 7.23, 5.63 MJ/(m<sup>2</sup>·d), and 3.58 MJ/(m<sup>2</sup>·d) respectively, indicating that the total diurnal quantity is the maximum in spring and summer, the middle in autumn, and the minimum in winter. The ratio of PAR to global radiation in cloudy days is greater than that in sunny days. A maximum value of 0.423 is observed in June, and a minimum value of 0.327 in January. Accordingly, the calculation model of photosynthetically active radiation for the tableland is proposed.

**Keywords:** Changwu tableland; photosynthetically active radiation; global radiation; climatological calculation

(上接第 160 页)

## Effects of two new dryland farming technologies on growth and fruit bearing of pear jujube trees in hilly regions

ZHAO Xia<sup>1</sup>, WANG You-ke<sup>1,2</sup>, LIU Shou-yang<sup>1</sup>, WEI Xin-guang<sup>1</sup>, LI Peng-hong<sup>3</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Soil and Water Conservation and Ecological Environment Research Center, Chinese Academy of Sciences,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Water Conservancy Bureau of Nanxun District, Huzhou, Zhejiang 313009, China)

**Abstract:** Under the condition of non-irrigation, the 9 year-old pear jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) trees [grafted on wild jujube (*Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow.)] was set as study material with different dryland farming technologies, which included water-saving type pruning technology, bamboo-type poly ditch technology and conventional dwarf pruning. And, comparison was made of the effects of each treatment on vegetative growth and reproduction growth of pear jujube trees. The results showed that water-saving pruning and bamboo-type contour ditch, either singly or in combination, could increase significantly the growth leaf area, the area of each leaf and the content of chlorophyll, and increase significantly the number of bearing branchlets and number of flowers. Compared with the control, water-saving pruning (HL) could raise the yield by 83.14%, and bamboo-type poly ditch (CJ) could raise it by 38.44%, while treatment HJ, combined with the HL and CJ technologies, harvested the most and the yield was 155% of the control. In Loess hilly regions in Northern Shaanxi, under the condition of non-irrigation, the water-saving pruning technology could play a main positive role in raising pear jujube yield, especially combining the bamboo-type contour ditch technology.

**Keywords:** pear-jujube; pruning technology; bamboo-type poly ditch technology; growth; fruit setting; yield