

卢伟萍,谭宗琨,刘志平,等. 基于日照时数的光合有效辐射估算方法研究[J]. 气象研究与应用,2021,42(4):56–61.

Lu Weiping, Tan Zongkun, Liu Zhiping, et al. Study on estimation method of photosynthetic effective radiation based on sunshine hours [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2021, 42(4): 56–61.

基于日照时数的光合有效辐射估算方法研究

卢伟萍¹, 谭宗琨^{1*}, 刘志平¹, 谢 映¹, 陈瑜琨²

(1. 广西壮族自治区气象科学研究所, 南宁 530022; 2. 南宁市武鸣区气象局, 南宁 530109)

摘要: 区域日序、时序光合有效辐射的准确估算是揭示区域农林产量、品质形成机理不可或缺的数据源。基于广西武鸣 2018 年 10 月 1 日至 2020 年 3 月 31 日地表太阳总辐射、光合有效辐射等观测数据, 统计分析了日序及其各时次地表太阳总辐射、光合有效辐射曝辐量与其对应的日照的变化关系。结果表明, 日序及其各时次的晴空指数与其对应的日照百分率呈现二阶函数变化, 而日序及其各时次的光合有效系数与其对应的晴空指数的自然对数呈现良好的线性变化关系, 尤以农作物、林果等主要生长季的 4—11 月期间效果最佳。由此而构建的基于日照时数的日序及其时次光合有效辐射估算模型, 对弥补农林产量、品质构成的光合作用影响机理研究等所需的基础数据源有重要意义。

关键词: 光合有效辐射; 晴空指数; 日照时数; 估算模型

中图分类号: P422

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.4.10

OSID:

引言

光合有效辐射 (Photosynthetically active radiation, 简称 PAR) 是植物进行光合作用不可或缺的能量来源, 也是估算区域光合生产潜力、碳汇等重要因子。随着天气、气候对农作物生长影响机理及农作物生长模拟研究的逐渐深入, PAR 观测资料的缺乏在一定程度上限制了区域气候资源的充分利用^[1]。因此, 通过构建区域气候估算模型来反演不同时间尺度的 PAR 值一直为国内外相关学者所关注^[2–16]。如国内学者张运林等^[17]以总云量、低云量等为主要因子构建太湖地区 PAR 值估算气候经验模型; 韩晓阳、季国良等^[19–20]则认为水汽压或订正后的水汽压等对长武塬区、张掖地区的 PAR 值估算起主导作用; 白建辉等^[20–21]在估算深圳地区 PAR 值时引入了大气成分、温湿度和太阳天顶角等因子, 但在估算华北地区的 PAR 值时则以水汽、散射等因子为主。针对光合有效系数 ($\eta_{PAR}=PAR/Q_t$) 受不同区域气溶胶、

天气现象、云状云量、水汽含量等^[3–4]气候因素的影响较大, 且云量云状等因素难以量化, 使得众多区域 PAR 值气候估算经验模型缺乏普适性等不足问题, 朱旭东、蒋冲等^[22–23]基于 Angstrom $A^{[2]}$ 的太阳辐射估算模型为基础, 扩展了光合有效系数与晴空指数的关系模型, 以此估算我国大陆地区、秦岭南北不同年代的 PAR 值并分析其时空变化规律, 为各地利用易获取的日照百分率来估算区域不同时间尺度的 PAR 值提供了借鉴。如张广奇等^[24]尝试应用日照时数估算辽宁锦州 PAR 时数, 获得超过一定阈值 ($\geq 300\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) PAR 时数的估算值与实测值无显著差异的结论。但需要指出的是, 大部分农作物、林果的光合补偿点多在 $60\sim 80\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 远低于 PAR 时数的估算阈值 $300\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 且不同种类农作物、林果的生长周期及产量、品质形成关键期起止日期及相应的光饱和点存在一定差异, 而月、季、年尺度 PAR 值的估算却难以应用于农林作物产量、品质形成的机理分析。因此, 构建可较好地估算日序

收稿日期: 2021-07-25

基金项目: 广西自然科学基金项目 (2018GXNSFAA281229)、广西重点研发计划项目 (桂科 AB21196041)

作者简介: 卢伟萍 (1978—), 女, 高级工程师, 主要从事天气预报、应用气象与服务研究。E-mail: 530731901@163.com

* 通讯作者简介: 谭宗琨 (1966—), 男, 正研级高级工程师, 主要从事应用气象与服务研究。E-mail: tanzongkun@163.com

及其各时次 PAR 值的经验估算模型,解决区域日序、时序 PAR 值缺测的难题,对揭示光合有效辐射对农作物、林果生长发育进程、产量与品质构成影响等机理的研究具有十分重要的意义。为此,选择我国沃柑种植面积较大区域的南宁市武鸣区 2018 年 10 月至 2020 年 3 月逐日、逐时太阳辐射、光合有效辐射和日照等实测资料为数据源,拟通过分析日序、时序 PAR 实测值与其对应的日照实测值变化关系,建立基于日照时数的光合有效辐射估算经验模型,探索应用日照时数等数据来估算区域日序及各时次 PAR 值可行性,期待为区域气候资源充分利用提供参照。

1 研究区概况

南宁市武鸣区是典型的南亚热带季风气候区,年平均气温 22.1°C ,年平均雨量 1280mm ,年日照时数 1600h ;主要农作物、林果为糖料蔗、柑橘等。

2 资料与方法

2.1 数据来源

南宁市武鸣区历年逐日、逐时日照等数据来源于武鸣区气象局。2018 年 10 月 1 日至 2020 年 3 月 31 日地表太阳辐射 Q 、光合有效辐射 PAR 等数据来源于南宁市武鸣区城厢镇农业气象自动观测站 ($108^{\circ}7'25''\text{E}$, $23^{\circ}11'45''\text{N}$)。该站利用江苏省无线电科学研究所有限公司生产的分光光谱辐射传感器。分光光谱辐射传感器等仪器观测期间经过设备供应商校准。采样频率和记录样本为每分钟瞬时值。

2.2 数据处理

(1) 剔除光合有效辐射 $PAR < 60\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (喜阳植被光补偿点)的时次观测值。

(2) 将逐日地表太阳辐射 Q_{\min} 、 PAR_{\min} 分钟瞬时平均值整理为 1h 累计值 (Q_h 、 PAR_h)。

(3) 将日出至日没各时次的 Q_h 、 PAR_h 整理为 1d 累计值 (Q_d 、 PAR_d)。

(4) 选取 2019 年 1—12 月逐日、逐时 PAR 等观测数据为样本,构建区域 PAR 值气候估算经验模型。2018 年 10—12 月和 2020 年 1—3 月的逐日、逐时 PAR 等观测数据用于检验模型效果。

2.3 研究方法

2.3.1 日序、时序地表太阳辐射扩展

日序及各时次大气层顶太阳辐射及日序可照时数计算参照曾燕^[3]等计算公式(1)一(6):

$$Q_{ac} = \frac{G_0}{\pi} d_r (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (1)$$

$$Q_{ac-t} = Q_{ac} \sinh = Q_{ac} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta) \cos t \quad (2)$$

$$d_r = 1 + 0.33 \cos \left(\frac{2\pi}{365} J \right) \quad (3)$$

$$\delta = 0.4093 \sin \left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right) \quad (4)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (5)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (6)$$

式中 Q_{ac} —日序大气层顶太阳辐射值, Q_{ac-t} —日序时次大气层顶太阳辐射值, G_0 —太阳常数,取值为 $1367\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, d_r —地球绕日轨道偏心率, ω_s —日落时角, φ —研究区地理纬度, δ —太阳倾角 (赤纬角), J —日序, t —时角, h —太阳高度角, n —实际日照时数, N —日序可照时数。

基于日序、时序地表太阳总辐射实测数据及其对应的日照百分率数据,分别构建日序、时序晴空指数 $k_t = Q/Q_{ac}$ 与日照百分率 (n/N) 的线性、非线性关系模型,选择拟合效果较好的模型作为区域日序、时序地面太阳总辐射估算扩展模型。

2.3.2 日序、时序光合有效辐射的扩展

基于南宁市武鸣区 2019 年 1—12 月逐日、逐时 PAR 等观测数据,分别采用线性、非线性分析法构建光合有效系数 $\eta_{PAR} = PAR/Q_t$ 与其对应晴空指数变化关系模型,选择拟合效果较好的模型作为区域日序、时序光合有效辐射估算扩展模型。

3 结果与分析

3.1 时序日照对 PAR_h 的影响

为了揭示时序日照对时序光合有效辐射影响的季节性差异,选择全年最冷月 1 月、最热月 7 月逐日逐时光合有效辐射随对应时次日照变化进行比较。从南宁市武鸣区最冷 1 月、最热 7 月逐日逐时 PAR_h 与对应时次的日照变化曲线可以看出: PAR_h 值时序变化大致呈现单峰型曲线,早、晚 PAR_h 很弱,峰值多出现在中午前后;月内的 PAR_h 时值大小变化与日照出现的时次、时长变化大致同步。

实测数据表明:相同的日照时次、时长,夏季 7 月的 PAR_h 值均大于冬季 1 月的 PAR_h 值。这与夏季太阳直射北半球时,地表太阳辐射值、光合有效辐射值相对较高,而冬季太阳直射南半球,地表太阳辐射值、光合有效辐射值相对较低是一致的。换言之, PAR_h 值随季节、日照时长和日照出现的时次而变。

3.2 日照时长对 PAR_d 的影响

日照时长是指太阳直接辐射量 $\geq 120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的时间累计(单位:0.1h),而太阳直接辐射量主要要集中于可见光区(波段 380~710nm),太阳可见光总辐射量即为光合有效辐射量^[12]。为了揭示不同日照时长下光合有效辐射的差异,统计不同日照时长对应的 PAR_d 日值,结果发现, PAR_d 日值随日照时长变化明显,日照时长越长, PAR_d 日值越大,随季节变化显著。其中晴天情形下(日照时数 $\geq 8.1 \text{ h}$)的 PAR_d 日值时序变化近似单峰型,夏季 PAR_d 日值为全年最大,冬季 PAR_d 日值为全年最小,春秋两季 PAR_d 日值则介于夏冬日值之间(图 1)。而多云转晴或晴转多云、多云或阴天情形下(日照时长为 5.1~8.0h 或以下)的 PAR_d 值时序峰值变化则呈现非线性关系(图 2),这可能是不同月份之间日照出现的时序与时长、云量

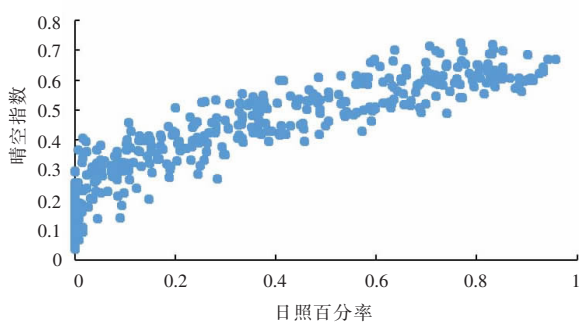


图 1 2019 年 1—12 月逐日晴空指数随日照百分率变化

为客观反映晴空指数随日照变化,应用最小二乘法分别构建日、时次晴空指数与日照百分率、时长的一阶、二阶、三阶和指数关系模型。结果表明:日晴空指数 K 与日照百分率(n/N)、时次晴空指数 K_i 与时次日照 n_i 的二阶函数关系式,其模型回代、样本检验效果最优(图略)。

根据晴空指数定义,南宁市武鸣区逐日地面太阳辐射估算模型可转换为:

$$Q_d = (a + b \frac{n}{N} + c \frac{n^2}{N^2}) Q_{ac} \quad (7)$$

式中 a 、 b 、 c 为待定系数。基于实测数据统计,南宁市武鸣区日地面太阳辐射估算模型的待定系数分别为 0.1526、1.1673、-0.739。模型复相关系数 $R^2 = 0.8940$,达到置信度 $\alpha = 0.001$ 的显著性水平检验。

南宁市武鸣区日出至日没的各时次地面太阳辐射估算模型可转换为:

$$Q_h = (d + e n_i + f n_i^2) Q_{ac-i} \quad (8)$$

式中 d 、 e 、 f 为待定系数。基于实测数据统计,南

云状等存在差异所致。

3.3 地表太阳辐射 Q 估算模型的扩展

较长序列的太阳总辐射观测数据是区域太阳能资源开发利用的重要基础。为了有效弥补区域太阳总辐射观测站点稀少、观测年限有限等不足,国内外不少学者采用地表太阳总数辐射与日照百分率的线性关系来推算区域太阳总辐射^[13]。但从 2019 年 1—12 月日晴空指数($k = Q_d / Q_{ac}$)与对应的日照百分率(n/N)、日各时次晴空指数($K_i = Q_h / Q_{ac-i}$)与对应时次日照(n_i)变化关系可以看出:尽管日晴空指数、日各时次晴空指数总体随对应的日照百分率、对应时次日照时长呈现增大趋势,但不同季节、不同日期,因日照出现的时次、时长存在一定差异,导致相同日照百分率或相同日照时长所对应的晴空指数差异明显(图 1、2)。

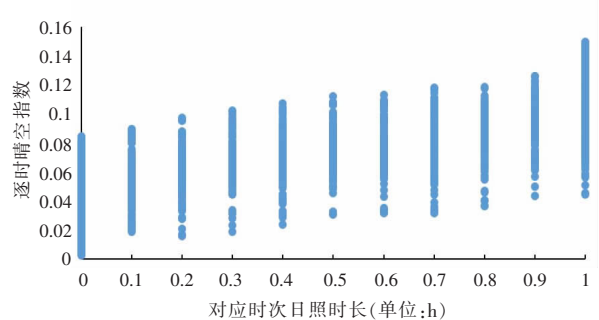


图 2 2019 年 1—12 月逐时晴空指数随对应时次日照时长

宁市武鸣区时次地面太阳辐射估算模型的待定系数取值分别为 0.0328、0.1042、-0.0367。模型复相关系数 $R^2 = 0.7255$,达到置信度 $\alpha = 0.001$ 的显著性水平检验。

3.4 光合有效辐射 PAR 估算模型的构建

以南宁市武鸣区 2019 年 1—12 月逐日、逐时太阳辐射、光合有效辐射和日照等实测资料为数据源,分析日序光合有效系数($\eta_{PAR-d} = PAR_d / Q_d$)、时次光合有效系数($\eta_{PAR-i} = PAR_h / Q_h$)与其对应晴空指数的线性、非线性变化关系,结果发现:日序光合有效系数、日序逐时光合有效系数与其对应的晴空指数的自然对数呈现良好的线性变化关系(图略)。其关系式为:

$$PAR_i = (g + h \ln K_i) Q_i \quad (9)$$

式中 i 为日或时次。

基于实测数据,应用最小二乘法构建的日序光合有效辐射 PAR_d 估算模型为:

$$PAR_d = (0.3513 - 0.0174 h \ln K_d) Q_d \quad (10)$$

模型复相关系数 $R^2=0.6082$, 达到置信度 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验。

日序时次光合有效辐射 PAR_t 估算模型为:

$$PAR_t=(0.3028-0.0217h\ln K_t)Q_t \tag{11}$$

模型复相关系数 $R^2=0.5526$, 达到置信度 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验)。

日序、时次模型参数与朱旭东等^[23]给出的参数(0.38, -0.04)、何洪林^[25]给出的参数(0.40, -0.03)存在一定差异。这可能与研究区域、统计样本的时间尺度等存在差异有关。

将(7)式代入(9)式, 可得到区域基于日照百分率的日序估算通用模型为:

$$PAR_d=(g+h\ln K_d)Q_d=(g+h\ln(a+b\frac{n}{N}+c\frac{n^2}{N^2}))\times(a+b\frac{n}{N}+c\frac{n^2}{N^2})\times Q_{ac} \tag{12}$$

同理, 将(8)入(9)式, 可获得基于时次日照时长的日序时次 PAR_t 估算通用模型为:

$$PAR_t=(g+h\ln K_t)Q_t=(f+g\ln(d+en_t+fn_t^2))\times(d+en_t+fn_t^2)\times Q_{ac-t} \tag{13}$$

3.5 估算模型效果检验

分析逐月的日序地表太阳辐射、光合有效辐射估算模型回代检验和模拟检验效果, 结果显示: 5~11 月的日序地表太阳辐射、光合有效辐射估算值与实测值的平均相对误差为 7.9%~20.2%, 估算效果最好; 4 月、12 月的平均相对误差为 22.3%~30.75%; 而

冬春衔接的 1 月、2 月、3 月份, 估算效果最差, 平均相对误差 36.77%~65.65%, 尤其是当日照时数为 0、且白天时段 08—20 时降水 ≥ 1.0 情形下, 日值相对误差高达 113.0%~316.0%。原因可能是 2—4 月期间静止锋长期停滞在华南上空, 多为低温、阴雨寡照天气, 使得仪器仪表对地表太阳辐射和光合有效辐射观测响应缓慢而导致模拟值明显偏高)。此外, 对盛夏的雨后、尤其是夜间出现明显降雨后的第二天或第三天的日太阳辐射曝辐量、光合有效曝辐量出现跳跃性增大情形下, 模拟值与实测值的相对误差也较大, 最高有达 50% 以上。尽管如此, 估算模型效果仍优于 Angstrom^[2]和周允华^[5]、朱旭东^[22]、蒋冲^[23]、张广奇^[28]等给出的气候学估算模型。

日序各时次的地表太阳辐射、光合有效辐射估算模型月份回代、检验效果与日序的月份变化大致同步。但时次的平均相对误差变幅明显大于日值, 这可能是不同日序间日照的时次、时长变化幅度明显大于日序日照时数所致。

从表 1 给出的 2019 年 1—12 月的日及其各时次地表太阳辐射、光合有效辐射估算模型回代平均绝对误差、平均相对误差, 以及 2018 年 10—12 月、2020 年 1—3 月日及其各时次地表太阳辐射、光合有效辐射估算模型检验平均绝对误差、平均相对误差, 可以看出: 基于日序日照时数的地表太阳辐射、光合有效辐射估算模型回代、检验效果总体优于基于时次日照时长的估算模型。

表 1 基于日照时数的表太阳辐射、光合有效辐射估算模型效果检验

时段	2019 年 1—12 月回代		2018 年 10—12 月模拟		2020 年 1—3 月模拟	
	平均绝对误差	平均相对误差(%)	平均绝对误差	平均相对误差(%)	平均绝对误差	平均相对误差(%)
日地表太阳辐射 Q_d	1.77 (MJ · m ⁻²)	25.86	1.19(MJ · m ⁻²)	21.12	1.58(MJ · m ⁻²)	47.81
日光合有效辐射 PAR_d	2.95(mol · m ⁻²)	24.57	2.75(mol · m ⁻²)	19.35	2.83(mol · m ⁻²)	41.87
时次地表太阳辐射 Q_t	0.26(MJ · m ⁻²)	43.21	0.25(MJ · m ⁻²)	39.18	0.25(MJ · m ⁻²)	58.19
日光合有效辐射 PAR_t	0.42(mol · m ⁻²)	40.28	0.52(mol · m ⁻²)	34.01	0.40(mol · m ⁻²)	40.95

4 结论与讨论

日序的日照百分率大小及日序时次的日照时长与地表太阳辐射演变具有很好的一致性。因此, 应用易获得的日照百分率等观测数据来构建区域日序及其时次的光合有效辐射经验估算模型, 能较好地反演不同日照时长的光合有效辐射值, 尤其是对大宗

粮食、经济作物及主要林果的主要生长季多集中在 4—11 月而言, 期间的日序及其时次的光合有效辐射值与实测值的误差范围相对较小, 完全可满足农林生长季光合生产力估算及揭示光合有效辐射对农林产量、品质构成影响机理等研究对光合有效辐射等数据源的需求。

需要指出的是, 模型对雨后、尤其是夜间出现明

显降雨后的第二天或第三天的日太阳辐射曝辐量、光合有效曝辐量出现跳跃性增大现象,以及冬末至早春的持续低温、阴雨、寡照天气,辐射曝辐量、光合有效曝辐量处于明显低值情形下,其模型的拟合或检验值与实测值相差甚大。如何量化不同时段降水、气温、湿度等因素对晴空指数的影响,尚需更多的观测资料佐证。此外,日序时次的大气层顶太阳辐射值随太阳高度角变化,取日序各时次对应的大气层顶太阳辐射整点的瞬时值、时次的均值,是否影响到地面太阳辐射、光合有效辐射估算模型的构建与拟合、检验效果尚有待进一步验证。

参考文献:

- [1] 刘一江,廖雪萍,李耀先,等.增温对水稻生长影响研究进展[J].气象研究与应用,2017,38(4):54-57.
- [2] Angstrom A. Solar and terrestrial radiation [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1924, 50: 121-125.
- [3] 曾燕,邱新法,刘绍民,等.起伏地形下天文辐射分布式估算模型[J].地球物理学报,2005,48(5):1028-1033.
- [4] 董振国,于沪宁.农田光合有效辐射观测与分析[J].气象,1983(7):23-25.
- [5] 周允华,项月琴,单福芝,等.光合有效辐射(PAR)的气候学研究[J].气象学报,1984,42(4):387-397.
- [6] 周允华,项月琴.太阳直接辐射光量子通量的气候学计算方法[J].地理学报,1987,42(2):116-128.
- [7] 王炳忠,税亚欣.关于光合有效辐射的气候学计算问题[J].太阳能学报,1988,(9):59-65.
- [8] 周允华,项月琴,栾禄凯,等.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.
- [9] Alados I, Foyo-Moreno I, Alados-Arboledas L. Photosynthetically active radiation: Measurements and modelling [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 78(1-2): 121-131.
- [10] Alados I, Alados-Arboledas L. Validation of an Empirical Model for Photosynthetically Active Radiation. International [J] Journal of Climatology, 1999, 19(10): 1145-1152.
- [11] 吕宁,刘荣高,刘纪远.1998—2002 年中国地表太阳辐射的时空变化分析[J].地球信息科学学报,2009,11(5): 623-630.
- [12] 童成立,张文菊,汤阳,等.逐日太阳辐射的模拟计算[J].中国农业气象,2005,26(3):165-169.
- [13] González J A, Calbó J. Modelled and Measured Ratio of PAR to Global Radiation under Cloudless Skies [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 110(4): 319-325.
- [14] 张玉坤,金龙,广西旬太阳直接辐射和旬散射辐射的气候学计算方法及收入概况[J],广西气象,1980,4:7-17.
- [15] 苏志,涂方旭,广西太阳总辐射的计算及分布特征[J],广西气象,2003,4:32-34.
- [16] 董泰锋,蒙继华,吴炳方,等.光合有效辐射(PAR)估算的研究进展[J].地理科学进展,2011,30(9):1125-1134.
- [17] 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.
- [18] 韩晓阳,刘文兆,朱元骏.长武塬区光合有效辐射的基本特征及气候学计算 [J]. 干旱地区农业研究,2012,30(4):166-171.
- [19] 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.
- [20] 白建辉,李楠.深圳光合有效辐射计算方法的初探[J].地球科学前沿,2018,8(4):837-844.
- [21] 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.
- [22] 朱旭东,何洪林,刘敏,等.近 50 年中国光合有效辐射的时空变化特征[J].地理学报,2010,65(3):270-280
- [23] 蒋冲,朱枫,杨陈等.秦岭南北地区光合有效辐射时空变化及突变特征 [J]. 地理科学进展,2013,32 (3):435-446.
- [24] 张广奇,朱教君,李荣平,等.基于日照时数的光合有效辐射(PAR)时数估算方法[J].生态学杂志,2015,34(12): 3560-3567.
- [25] 何洪林.中国陆地区域太阳辐射要素空间化研究[D].北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2004.

Study on estimation method of photosynthetic effective radiation based on sunshine hours

Lu Weiping¹, Tan Zongkun^{1*}, Liu Zhiping¹, Xie Ying¹, Chen Yukun²

(1. Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning 530022, China;

2. Wuming Meteorological Bureau, Nanning 530109, China)

Abstract: The accurate estimation of regional diurnal and temporal photosynthetic effective radiation is an indispensable data source to reveal regional agricultural and forestry yield and quality formation mechanism. Based on the observation data of surface total solar radiation and photosynthetic effective radiation in Wuming, Guangxi from October 1, 2018 to March 31, 2020, this paper statistically analyzed the variation relationship between the daily sequence and the surface total solar radiation as well as photosynthetic effective radiation exposure at each time and their corresponding sunshine. The results show that the day sequence and the clear sky index of each time and its corresponding sunshine percentage show a second-order function change. The photosynthetic effective coefficient of the day sequence as well as its respective time periods and the corresponding natural logarithm of the clear sky index show a good linear relationship, especially from April to November during the main growing seasons of crops and forest fruits. The estimation model of daily sequence and time photosynthetic effective radiation based on sunshine hours is of great significance to make up for the basic data source needed for the study of photosynthesis influence mechanism of agricultural and forestry yield and quality composition.

Key words: photosynthetic effective radiation; clear sky index; sunshine hours; estimation model