

谭宗琨,李政,丁美花,等. 1961—2020 年广西光合有效辐射时空分布特征[J]. 气象研究与应用,2022,43(4):07–12.

Tan Zongkun, Li Zheng, Ding Meihua, et al. Spatio-temporal variation characteristics of photosynthetic active radiation in Guangxi during 1961 to 2020[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2022, 43(4): 07–12.

1961—2020 年广西光合有效辐射时空分布特征

谭宗琨, 李 政, 丁美花, 谢 映, 刘志平

(广西壮族自治区气象科学研究所, 南宁 530022)

摘要: 为揭示广西区域光合有效辐射(PAR)的时空分布特征,基于广西地面太阳总辐射、PAR 等观测资料,构建了以日照时数为变量的 PAR 值气候学非线性关系估算模型,以此估算广西区域近 60a 日序 PAR 值;结合 GIS 空间分析技术和 t 检验趋势分析法,分析了年、季、月和农林生长季 PAR 时空分布特征。结果表明,广西年、农林作物生长季的 PAR 值大致呈纬向型分布,南高北低,时间序列总体呈波动下降趋势,变幅在 $-0.406 \sim -0.465 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 之间;季、月 PAR 值呈现空间异质性,时间序列波动下降趋势较平缓。

关键词: 广西;光合有效辐射;非线性模型;时空变化

中图分类号: P422.1

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.4.02

引言

光合有效辐射 (Photosynthetically active radiation, 简称 PAR, 下同) 是植物进行光合作用不可或缺的能量来源,对农作物或林果产量^[1-2]、品质^[3-5]的构成起主导作用,同时也是开展区域光合生产潜力、陆地生态系统碳汇和生物生长模拟研究重要基础数据。但国内区域 PAR 数据的长期缺测,却在一定程度上限制了区域农业气候资源的充分利用。对此,国内不少学者一直致力于区域 PAR 值估算气候学模型研究^[6-9],并成功应用于局地或区域不同时间尺度 PAR 的估算。如韩晓阳^[10]、季国良^[11]、白建辉^[12-14]、蒋冲^[15]、刘新安^[16]、张运林^[17]、高黎明^[18]、张宪洲^[19]、李英年^[20]、李麟辉^[21]等通过构建属地化的 PAR 经验公式,分别对长武塬区、张掖地区、深圳、华北地区、内蒙古、秦岭南北、辽宁、太湖地区、青海湖、青藏高原、祁连山、哀牢山等区域 PAR 时空变化特征进行了较详尽的分析。广西是我国为数不多的南亚热带农林作物主要种植区,而单独针对广西区域 PAR 估算研究的相关报道甚少。国内部分学者在尝试开展国家乃至全球尺度的 PAR 值估算时虽涉及到广西区域 PAR 的估算内容,但因数据类型、来源不尽相

同,给出的广西区域 PAR 估算值差异巨大。如朱旭东等^[22]通过对中国 1961—2007 年 PAR 值估算,给出广西东南部地区 PAR 值约为 $23.0 \sim 28.0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,与广东、福建等地 PAR 值接近,广西西北部约为 $20.0 \sim 23.0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,处于我国 PAR 值次低值区;唐利琴等^[23]在“1961—2014 年中国光合有效辐射重构数据集”中则给出广西大部 PAR 值仅为 $15.0 \sim 20.0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,仅为朱旭东等^[22]估算值的 70% 左右;而张海龙等^[24]在“中国—东盟 5km 分辨率光合有效辐射数据集”中给出广西 PAR 值却比朱旭东等^[22]估算值高约 50%;张春燕等^[25]应用 2001—2010 年 MODIS 遥感数据估算全球陆地光合有效辐射月最大值时,则给出广西逐月陆地 PAR 月最大值总体处于我国 PAR 值相对高值区。显然,对缺失 PAR 观测资料佐证的区域而言,PAR 估算值的悬殊差异无疑给数据的合理选取及应用带来了极大困扰。因此,基于现有太阳总辐射、光合有效辐射等气象台站观测资料,构建与广西气候特点相宜的 PAR 值估算模型,以此估算并揭示广西区域 PAR 值的时空变化规律,进而为区域开展农林作物光合特性、碳汇量估算等研究提供基础数据源是非常必要的。

收稿日期: 2022-09-15

基金项目: 广西重点研发计划“广西糖料蔗碳汇气象评估关键技术与应用”(桂科 AB22035069)

作者简介: 谭宗琨(1966—),男,广西浦北人,正研级高级工程师,研究方向为应用气象与服务。E-mail: tanzongkun@163.com

1 数据与方法

1.1 数据来源

广西区域 90 个国家基本气象站 1961—2020 年逐日气温、降水、日照等气象要素,及南宁和桂林 1961—2020 年、北海 1993—2020 年逐日地面太阳总辐射数据来源于广西气象信息中心。南宁市武鸣区 2018 年 10 月—2020 年 3 月的分钟地面太阳总辐射 Q_{\min} 、光合有效辐射 PAR_{\min} 及其对应时次的逐时日照资料等来源于南宁市武鸣区气象局。

1.2 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)将分钟地面太阳总辐射 Q_{\min} 、光合有效辐射 PAR_{\min} 整理为日值地面太阳总辐射 $Q_{t-i} = \sum_{\text{日出时次}}^{\text{日没时次}} Q_{\min}$ 、

日值光合有效辐射 $PAR_{t-i} = \sum_{\text{日出时次}}^{\text{日没时次}} PAR_{\min}$ 。

将光合有效辐射记录的光量子单位 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 与能量单位 Wm^{-2} 进行转换^[26]:

$$1 \text{ Wm}^{-2} = 4.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1)$$

(3)统计并将广西国家基本气象站连续 5d 滑动平均气温稳定 $\geq 10.0^\circ\text{C}$ 的首日、终日作为农林生长季起、止日。

1.3 研究方法

1.3.1 日序地表太阳总辐射 Q_{t-i} 扩展

广西区域各纬度的日序大气层顶辐射量 $Q_{\infty-i}$ 和日序可照时数 N_i 由(2)—(6)式求出^[27]:

$$Q_{\infty-i} = \frac{G_0}{\pi} d_r (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (2)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (3)$$

$$d_r = 1 + 0.33 \cos \left(\frac{2\pi}{365} J \right) \quad (4)$$

$$\delta = 0.4093 \sin \left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right) \quad (5)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (6)$$

式中 G_0 为太阳常数(取值为 $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$); d_r 为地球绕日轨道偏心率; ω_s 为日落时角; φ 为纬度; δ 为阳倾角; J 为日序。

以广西桂林、南宁、北海历年逐日地表太阳总辐射 Q_{t-i} 及日照时数 n_i 为数据源,应用数理统计分别构建日序晴空指数 ($K_{t-i} = Q_{t-i}/Q_{\infty-i}$) 与对应日序的日照百分率 (n_i/N_i) 的一阶、二阶、三阶和指数关系模型。选取模型回代、样本检验效果最优的二阶函数关系模

型作为广西区域日序地面太阳总辐射估算扩展模型:

$$K_{t-i} = Q_{t-i}/Q_{\infty-i} = a + b \frac{n_i}{N_i} + c \frac{n_i^2}{N_i^2} \quad (7)$$

式中 n_i 为日序实际日照时数; a 、 b 、 c 为待定系数。取值分别为 0.1526、1.1673、-0.739。

1.3.2 日序 PAR_{t-i} 扩展

应用南宁市武鸣区 2018 年 10 月—2020 年 3 月日序太阳辐射、光合有效辐射等实测值,构建光合有效系数 ($\eta_{PAR_{t-i}} = PAR_{t-i}/Q_{t-i}$) 与其对应晴空指数的对数变化线性关系模型^[28]:

$$\eta_{PAR_{t-i}} = PAR_{t-i}/Q_{t-i} = g + h \ln K_{t-i} \quad (8)$$

式中 g 、 h 为经验系数,取值分别为:0.3513、-0.0174。经验系数 g 、 h 与朱旭东等^[22]给出的全国平均参考值 0.38、-0.04 存在一定差异。

综合(7)、(8)公式,广西区域历年日序光合有效辐射 PAR_{t-i} 估算模型为:

$$PAR_{t-i} = (0.3513 - 0.0174 \ln(0.1526 + 1.1673 \frac{n_i}{N_i} - 0.736 \frac{n_i^2}{N_i^2})) \times (0.1526 + 1.1673 \frac{n_i}{N_i} - 0.736 \frac{n_i^2}{N_i^2}) \times Q_{\infty-i} \quad (9)$$

光合有效辐射月 PAR_{t-m} 、季 PAR_{t-s} 、农林生长季 PAR_{t-g} 、年 PAR_{t-a} 值为相应时段 $[j, k]$ 的逐日光合有效辐射值 PAR_{t-i} 的合计,即 $\sum_{j=i}^k PAR_{t-i}$ 。

1.3.3 光合有效辐射 PAR_t 空间插值

鉴于日序大气层顶辐射量 $Q_{\infty-i}$ 、可照时数 N_i 随纬度变化,日照时数的季节性天气变化与经度、纬度、海拔高度等密切相关,构建气象站点光合有效辐射值 PAR_t 与其对应的经度、纬度、海拔高度的多元线性回归模型,以此推算区域网格点月、季、农林生长季和年 PAR_t 值。

1.3.4 光合有效辐射 PAR_t 时间变化分析

应用滑动 t 检验和线性倾向法对桂林、南宁、北海等代表区域的时间序列 PAR_t 数据时间趋势变化和检验。

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \times \sqrt{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}}} \quad (10)$$

$$s = \sqrt{\frac{m_1 s_1^2 + m_2 s_2^2}{m_1 + m_2 - 2}} \quad (11)$$

其中 \bar{x}_1 、 \bar{x}_2 和 s_1 、 s_2 分别为代表区域具有 m 个样本量的时间序列 x 某一时刻的基准点前后两个子序列 m_1 、 m_2 的平均值和方差。设定 $\alpha=0.01$ 显著性水平下 t 分布表的临界值 $t_a \geq |t|$,则认为基准点前后的两

个子序列均值无显著差异, 反之认为基准点时刻出现突变。

代表区域 PAR_t 数据序列的气候倾向率采用如下公式进行估计:

$$PAR_{t-i} = a + bt_i \quad (12)$$

2 结果与分析

2.1 年 PAR_{t-a} 值空间分布特征

从广西区域 1961—2020 年日平均 PAR_{t-a} 值分布看(详见图 1): 广西年日平均 PAR_{t-a} 总体呈现纬向分布。其中地处桂北的桂林、河池两市大部, 以及百色、柳州两市北部山区和位于大瑶山的来宾市金秀县及广西暴雨中心之一的都安县等地多年日平均 PAR_{t-a} 值在 $16.44 \sim 21.92 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间, 为广西区域 PAR_{t-a} 值低值区; 地处桂南的钦州、北海两市沿海和玉林市南部, 以及地处十万大山北侧的防城港市上思县多年的日平均 PAR_{t-a} 值在 $24.66 \sim 27.40 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间, 为广西区域 PAR_{t-a} 值高值区; 其余大部多年的日平均 PAR_{t-a} 值为 $21.92 \sim 27.40 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间。应用该模型估算广西区域多年日 PAR_{t-a} 值, 结果表明: 广西区域多年日 PAR_{t-a} 估算值除低值区估算值稍偏低外, 大部区域估算值与朱旭东等^[22]给出的估算值接近, 明显高于唐利琴等^[23]给出的估算值。需要指出的是, 受山脉走向的影响,

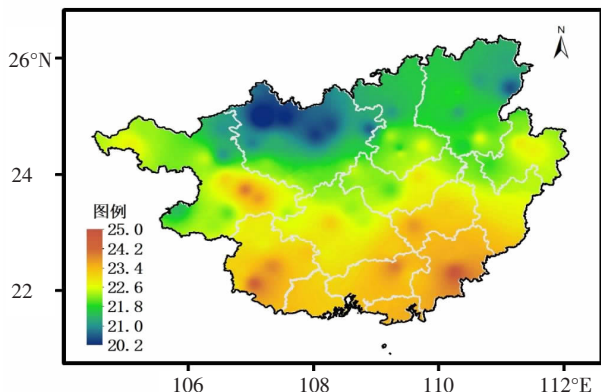


图 1 广西区域多年日平均 PAR_{t-a} 值分布图(单位: $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

左江、右江河谷盆地和十万大山北侧的上思县则较同纬度区域的多年日平均 PAR_{t-a} 值偏高, 而十万大山南侧的防城港市大部多年的日平均 PAR_{t-a} 值明显低于同纬度区域。这可能与来自孟加拉湾的西南暖湿气流经十万大山的高山阻挡, 气流抬升、凝结并在东南侧形成多云、多降水天气而导致地表太阳总辐射 Q_{t-a} 、 PAR_{t-a} 值下降, 而西南暖湿气流越过十万大山后, 在大山西北侧形成下沉干、热气流, 天空相对晴朗、干燥、少雨而有利于地表太阳总辐射 Q_{t-a} 、 PAR_{t-a} 值上升所致。

2.2 季节 PAR_{t-s} 值空间分布特征

广西区域 PAR_{t-s} 值空间分布季节差异明显(见图 2)。其中春季左江、右江河谷及地处桂西的西林、

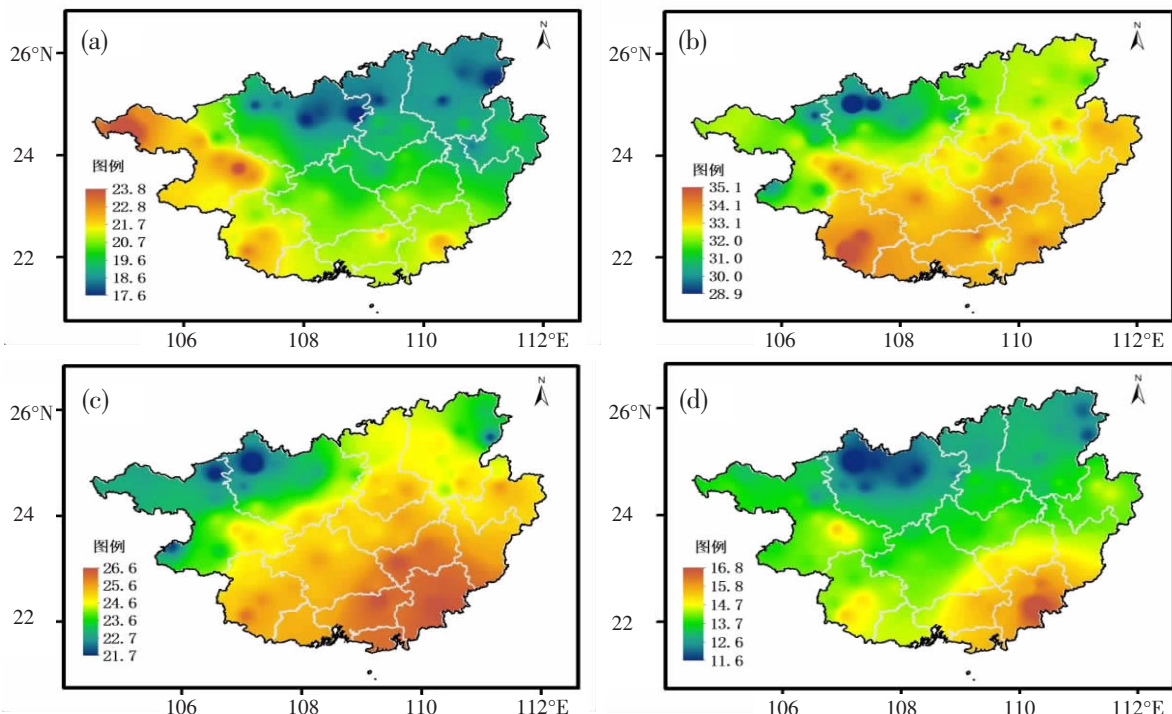


图 2 广西区域季节平均 PAR_{t-s} 值分布图(单位: $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

(a)春季; (b)夏季; (c)秋季; (d)冬季

田林两县及桂东的梧州市辖区大部,桂南的钦州、北海两市大部为 PAR_{t-s} 值高值区,桂北的河池、柳州、桂林、贺州等市大部为 PAR_{t-s} 值低值区。这与广西春季受北方分散性弱冷空气不断补充南下、并与孟加拉湾低槽槽前的西南气流交汇,在桂中、桂北一带形成华南静止锋,出现持续性低温阴雨寡照天气,最终导致 PAR_{t-s} 值偏低是相一致的。

广西区域夏季 PAR_{t-s} 值分布则呈现无规律状态,局部性高 PAR_{t-s} 值分布零散,而低 PAR_{t-s} 值区除地处广西中、北部的高海拔山区外,永福、兴安、融水、都安、马山和东兴等地易突发强降雨的暴雨中心也是广西区域的 PAR_{t-s} 低值区。查阅、比较地面气象观测的云量观测资料,结果表明,多发强降雨的暴雨中心,其对流云、积雨云、层积云出现的频次及云总量明显大于非暴雨中心区域;而高海拔山区常年易受气流抬升遇冷凝结,形成多雾、多雨天气,日照时数相对不足而导致 PAR_{t-s} 值呈现下降趋势(较低)。

进入秋、冬两季后,逐渐盛行西北-东南向大陆季风,在干、冷高压气团控制下,大部区域以晴空少雨天气为主, PAR_{t-s} 值的高低主要受其上空大气层顶太阳总辐射量的影响。这在一定程度上阐释了广西秋、冬两季 PAR_{t-s} 值大致呈现东南-西北向逐渐递减态势的成因所在。

2.3 月 PAR_{t-m} 值空间分布特征

广西 PAR_{t-m} 在不同地区各月 PAR_{t-m} 值差异明显。其中大部分区域 2 月 PAR_{t-m} 值为年度最小,3—8 月随月份逐渐增大,8 月达到全年最大,其后 9、10、11、12、1 月呈月递减态势。 PAR_{t-m} 值变化趋势与年度太阳直射南北回归线的大气层顶辐射量 Q_{ac-m} 值变化趋势类似,但月 PAR_{t-m} 极大、极小值滞后月 Q_{ac-m} 值极值约 2 个月。

需要指出的是,不同月份之间 PAR_{t-m} 值空间异质性呈现多样化。其中 1、2、3 月和 10、11、12 月的 PAR_{t-m} 值大致呈东南向西北递减趋势,而 4、5、6、7、8、9 月 PAR_{t-m} 值的空间异质性呈现无规则、多样化,其中 4 月地处桂西的西林、田林、右江、那坡为 PAR_{t-m} 高值区,次高值区为左江流域和沿海地区,其余大部为低值区,这可能是 4 月华南静止锋多盘踞桂中、桂北一带,多阴雨寡照天气所致。5 月广西东北、西南先后依次进入汛期,桂东北前汛期降雨天气过程多于桂西南,对应的 PAR_{t-m} 值比桂西南偏低。盛夏的 6、7、8 月和秋季的 9 月 PAR_{t-m} 值虽大致呈现南多、北少局面,但南北区域的月 PAR_{t-m} 极大、极

小值的差值相对冬半年而言有所偏小,这可能与夏半年太阳直射北半球,地处低纬地区大气层顶的太阳辐射值纬向差异较小有关。

2.4 农林生长季的 PAR_{t-g} 值空间分布特征

广西大部区域农林生长季总 PAR_{t-g} 值约为年度总 PAR_{t-a} 值的 65%~85%。事实上,农林生长季总 PAR_{t-g} 值的高低,在很大程度上取决于各地年度农林生长季开始、结束日期早晚及其生长季的长短,以及对应区域生长季的日照时数百分率的大小等。从广西各地多年连续 5d 滑动平均气温稳定 $\geq 10.0^{\circ}\text{C}$ 首日的日序看,日序值由南向北及高海拔山区后延,而终日的日序则随纬度增加和海拔高度的升高而提前。换言之,广西农林生长季呈现南部长,北部和高海拔山区短。由此而决定了生长季总 PAR_{t-g} 值空间分布与年总 PAR_{t-a} 分布类似,总体呈现南高北低的纬向分布,同一纬度高海拔山区生长季总 PAR_{t-g} 值比低海拔区域偏低(图 3)。

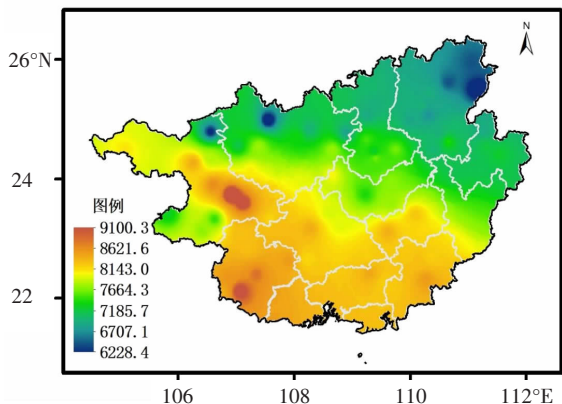


图 3 广西区域农林生长季 PAR_{t-g} 值分布图
(单位: $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

2.5 近 60 年广西 PAR_t 值变化趋势

经应用 t 检验对桂林、南宁、北海等代表区域 1961—2020 年的 PAR_{t-a} 值(详见图 4)时间突变点检测,结果表明:桂林、南宁、北海等代表区域 1961—2020 年的 PAR_{t-a} 值时间变化一致性较好,均未出现突变点,且总体呈现减少趋势。

其中桂林 PAR_{t-a} 数据序列的气候倾向率为 $-0.465 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 南宁 PAR_{t-a} 数据序列的气候倾向率为 $-0.453 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 北海 PAR_{t-a} 数据序列的气候倾向率为 $-0.406 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 通过 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验。

而月、季和农林作物生长季的光合有效辐射 PAR_{t-m} 、 PAR_{t-s} 和 PAR_{t-g} 值年度序列变化总体呈现平

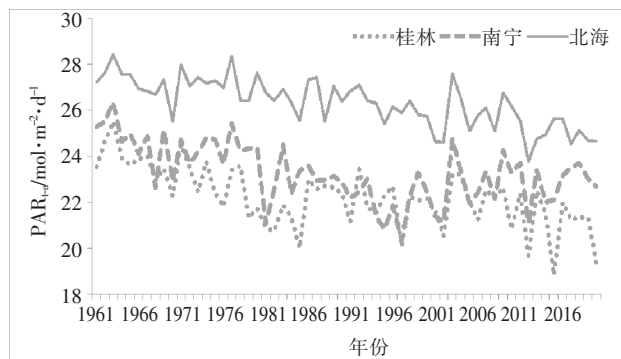


图4 广西代表站 1961—2020 年日均 PAR_{T-a} 值变化趋势图 (单位: $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

缓下降趋势,但年际间波动明显,且年际间波动幅度随地域而异。这与气温、降水、日照等气象因子的时空变化趋势基本一致。

3 结论与讨论

基于广西桂林、南宁、北海等代表站^[12]地面太阳总辐射、南宁市武鸣区光合有效辐射及有关国家基本气象站日照时数等观测资料,构建日照时数为因子的日序光合有效辐射 PAR_t 值估算气候学非线性关系模型,并以此估算模型分别生成广西各地历年逐日光合有效辐射 PAR_t 值的基础上,形成月、季、农林生长季和年度光合有效辐射 PAR_t 值,并结合 GIS 空间技术和 t 检验对其空间变化特征进行了初步分析,获得如下主要结论:

(1)广西 1961—2020 年广西光合有效辐射 PAR_{T-a} 均值、农林作物生长季 PAR_{T-g} 均值空间分布总体呈现纬向型分布,南高北低。近 60a 的数据序列气候倾向呈现减少趋势。

(2)秋冬两季 PAR_{T-s} 值空间分布大致呈现西北—东南向递增,春季 PAR_{T-s} 值空间分布骤然转为东北—西南向递增,夏季 PAR_{T-s} 值空间则呈现无规律状态,且 PAR_{T-s} 值空间差异较其他季节小。

(3)各月 PAR_{T-m} 值空间异质性明显。其中 2 月 PAR_{T-m} 值为年度最小,随后随着月份逐渐增大,8 月 PAR_{T-m} 值达到年度最大值后, PAR_{T-m} 值又随月份增加而呈递减态势。

基于 GIS 空间插值重演不同时间尺度的区域 PAR_t 值,在一定程度上揭示了复杂地理环境下广西区域 PAR_t 值时空分布特征,也弥补了广西区域不同时间尺度的像元 PAR_t 值的空白。但需要指出的是,有限站点观测表明,日照出现的时次、时长不尽相

同,相同的日序日照百分率其对应的光合有效辐射 PAR_t 存在一定的差异。而日照出现的时次、时长取决于云层类型,尤其是低层的成数,以及降水时段等天气状况,如何量化相互间的关系以提高光合有效辐射 PAR_t 估算精度,尚有待进一步分析。

参考文献:

- [1] 江东,王乃斌,杨小唤等. 吸收光合有效辐射的时序变化特征及与作物产量的响应关系[J]. 农业系统科学与综合研究,2002,18(1):51-54.
- [2] 董振国,于沪宁. 冬小麦田作物层光合有效辐射特征及干物质生产[J]. 中国农业气象,1984,5(4):11-13,25.
- [3] 张放,吴光林,张良诚,等. 光合有效辐射对不同柑桔品种之光合生产与结实的影响[J]. 浙江农业大学学报,1988,14(1):58-65.
- [4] 曲泽洲,王永蕙,赵玉. 光照对柿树结果及果实品质的影响[J]. 河北农业大学学报,1989,12(3):75-80.
- [5] 马跃. 元帅系苹果品质与树冠内光合有效辐射强度(PAR)的关系[J]. 中国农业气象,1992,13(5):6-8.
- [6] 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.
- [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(1):59-65.
- [8] 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.
- [9] 董泰锋,蒙继华,吴炳方,等. 光合(PAR)估算的研究进展[J]. 地理科学进展,2011,30(9):1125-1134.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Bai Jianhui, Wang Gengchen. The calculating method of photosynthetically active radiation in the Inner Mongolia grassland[J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(6):15-18.
- [15] 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.
- [16] Liu X N, Fan L S, Wang Y H, et al. The calculation methods and distributive character of solar radiation in Liaoning Province[J]. Resources Science, 2002, 24(1):82-87.
- [17] Zhang Y L, Qin B Q. The basic characteristic and climato-

- logical calculation of the photosynthetically available radiation in Taihu region[J]. *Acta Energlae Solaris Sinica*, 2002, 23(1): 118–123.
- [18] 高黎明, 张乐乐, 陈克龙, 等. 青海湖流域高寒湿地光合有效辐射特征[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(1): 50–56
- [19] Zhang X Z, Zhang Y G, Zhou Y H. Climatological estimation of photosynthetically active quantum value on Qinghai–Xizang Plateau from April to October[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(4): 361–365.
- [20] 李英年, 周华坤. 祁连山海拔高寒草甸地区植物生长期的光合有效辐射特征[J]. *高原气象*, 2002, 22(1): 90–95.
- [21] 李麟辉, 张一平, 游广永, 等. 哀牢山亚热带常绿阔叶林光合有效辐射的时空分布[J]. *生态学杂志*, 2001(11): 2394–2399.
- [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] 唐利琴, 刘慧, 胡波, 等. 1961—2014 年中国光合有效辐射重构数据集[J/OL]. *中国科学数据*, 2017, 2(3).
- [24] 张海龙, 辛晓洲, 李丽, 等. 中国–东盟 5km 分辨率光合有效辐射数据集(2013)[J]. *全球变化数据学报(中英文)*, 2017, 1(1): 40–44.
- [25] 张春燕, 郭杉, 关燕宁, 等. 2001—2010 年全球陆地光合有效辐射月最大值数据集[J]. *中国科学数据*, 2017, 2(3): 52–61.
- [26] 马金玉, 刘晶淼, 李世奎, 等. 基于试验观测的光合有效辐射特征分析[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(5): 673–682.
- [27] 高歌, 赵东, 陈洪武, 等 GB/T 31155–2014, 太阳能资源等级 总辐射[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [28] 卢伟平, 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.

Spatio-temporal variation characteristics of photosynthetic active radiation in Guangxi during 1961 to 2020

Tan Zongkun, Li Zheng, Ding Meihua, Xie Ying, Liu Zhiping
(Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning 530022, China)

Abstract: In order to reveal the spatio-temporal variation characteristics of photosynthetic active radiation (PAR) in Guangxi, a climatological nonlinear relationship estimation model of PAR with sunshine hours as variables was established based on the existing observation data of total Solar radiation and PAR on the ground, and then the daily PAR in Guangxi in recent 60 years were estimated; The spatio-temporal variation characteristics of PAR in annual, seasons, months, and agricultural and forestry growing seasons were disclosed by combining GIS spatial analysis technology and T-test trend analysis method. The results showed that the PAR of Guangxi in the annual and growing season of agricultural and forestry crops showed a zonal distribution, which was higher in the south and lower in the north. The time series showed a downward trend of fluctuation, with a decrease of $-0.406 \sim -0.465 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$; Seasonal and monthly PAR showed spatial heterogeneity, and the fluctuation of the time series declined gently.

Key words: Guangxi; photosynthetic effective radiation; nonlinear model; spatio-temporal variation;