

孙善磊, 周锁铨, 宋洁, 等. 2011. 应用 Penman 公式对江西省太阳总辐射变化特征的探讨 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 629–640. Sun Shanlei, Zhou Suoquan, Song Jie, et al. 2011. Discussion on the variation characteristics of the total solar radiation in Jiangxi Province utilizing penman equation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 629–640.

应用 Penman 公式对江西省太阳总辐射变化特征的探讨

孙善磊^{1,2} 周锁铨¹ 宋洁^{1,3} 石建红⁴ 顾人颖⁵ 黄珏¹

1 南京信息工程大学, 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

2 南京信息工程大学, 应用水文气象学院, 南京 210044

3 北伊利诺伊大学, 芝加哥 美国

4 浙江省温州市气象局, 温州 325027

5 宁波市气象局, 宁波 315012

摘 要 利用 1961~2000 年赣州站、南昌站的年太阳总辐射与相关气象要素资料, 结合 Penman 公式, 运用 6 种计算净长波辐射的方法估算了两站的年太阳总辐射; 建立了估算该地区年太阳总辐射的绝对误差权重法 (Method of Absolute Errors, MAE), 并给出了适用于江西省的绝对误差权重系数, 以此方法计算了江西省其他 76 站的年太阳总辐射; 并分析了该地区年太阳总辐射的时空分布特征及其变化趋势, 发现: (1) 1961~2000 年间, 江西省大部分地区太阳总辐射在 $3800\sim 4400 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 南部偏东地区较大, 且存在有一大值中心; 西部地区为江西省太阳总辐射最小的地区; (2) 40 年间, 江西省年太阳总辐射呈明显下降趋势, 每 10 年减少 $143.70 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。78 站中, 有 63 站的太阳总辐射的下降趋势通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验, 8 站表现为上升趋势; 江西省北部及南部地区太阳总辐射下降较大; 中部地区下降相对较小, 且在鄱阳湖东侧有一低值中心。

关键词 Penman 公式 小皿蒸发 太阳总辐射 江西省

文章编号 1006-9585 (2011) 05-0629-12 **中图分类号** P422.1 **文献标识码** A

Discussion on the Variation Characteristics of the Total Solar Radiation in Jiangxi Province Utilizing Penman Equation

SUN Shanlei^{1,2}, ZHOU Suoquan¹, SONG Jie^{1,3}, SHI Jianhong⁴, GU Renying⁵, and HUANG Jue¹

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Applied Hydrometeorological Research Institute, Nanjing 210044

3 Northern Illinois University, Chicago, USA

4 Wenzhou City Meteorological Bureau in Zhejiang Province, Wenzhou 325027

5 Ningbo City Meteorological Bureau, Ningbo 315012

Abstract Based on the annual total solar radiation and related meteorological data of monitoring stations of Gan-

收稿日期 2009-12-24 收到, 2011-05-20 收到修定稿

基金项目 国家自然科学基金资助项目 40775061/D0507, 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室 KLME05017

作者简介 孙善磊, 男, 1982 年出生, 博士研究生, 主要从事陆-气相互作用、气候预测及数值模拟、生态水文方面的研究。E-mail: ppsunsanlei@163.com

zhou and Nanchang from 1960 to 2000, the annual total solar radiation of the two stations were calculated with six net long wave radiation formulas combined with Penman equation. The Method of Absolute Errors (MAE), aiming at estimating the total solar radiation in the region, was proposed with the annual weight coefficients of MAE. The annual total solar radiation of the other 76 stations in Jiangxi Province was calculated with this method. Through the analysis of the temporal-spatial distribution and the trend of the annual total solar radiation of the province, the authors found that: (1) During 1961 to 2000, the value of the total solar radiation in the most parts of Jiangxi Province was $3800 - 4400 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The total solar radiation was high in the southeast region, where there was a large value center. The west part had a lower value than the other parts of the province; (2) For the whole province, the total solar radiation decreased in the past 40 years with the ratio of $143.70 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$. Among the total 78 stations, 63 stations passed the 0.05 significance level and six stations presented an upward trend. The total solar radiation showed a relatively larger decline in the northern and southern region than in the center part. And there was a low value center on the east side of Poyang Lake.

Key words Penman equation, 20-cm caliber pan evaporation, global solar radiation, Jiangxi Province

1 引言

太阳辐射是地球上生物有机体的基本能量来源,是自然环境中各种物理过程的重要能量来源。从瞬息变化的天气现象到亿万年来地球的演变都与太阳辐射和太阳活动有密切的关系。太阳辐射作为大气的唯一热源,成为控制气候的基本能量。它在地球上的时间和空间分布,制约着地球上气候系统的运动,是气候形成和演变过程中重要的外参数。同时,太阳辐射也是植物光合作用、植物蒸腾作用、土壤蒸发等陆面过程的主要驱动因子。因此,太阳辐射研究在国内外一些重大的研究计划中一直受到重视。

Angström (1922) 最先提出太阳辐射的气候计算公式; Kimball (1928) 根据美国站点资料,从云的遮蔽来考虑天空对到达地面的太阳辐射的影响得出另一形式的计算式。Angström (1922) 和 Kimball (1928) 所作的工作,奠定了总辐射气候计算方法研究的基础。随后,国内外学者基于云量信息的辐射估算模型、内插的方法、日温度振幅的预测地面辐射的模型、各类回归方程的方法,就太阳总辐射的计算进行了大量的研究 (Penman et al., 1948; 翁笃鸣, 1964; Kasten and Czeplak, 1980; 王炳忠, 1980; 朱志辉, 1982; Hay, 1984; Bristow and Campbell, 1984; Suckling et al., 1985; Zelenka et al., 1985; Zelenka and Lazic, 1987; 白建辉和王庚辰, 1993; Lam and Li, 1998; Thornton and Run-

ning, 1999; Muneer and Gul, 2000; Louis et al., 2004), 取得了丰硕的成果。

IPCC (2001) 的报告指出, 20 世纪最后 20 多年来全球增暖显著, 而 90 年代则是自有观测记录以来温度最高的 10 年。气候变化是当今全球共同面临的重大课题, 特别是全球变暖目前已成为世人关注的一个焦点。近年来国内外学者 (Rus-sak et al., 1990; Grabbe and Grassl, 1994; Stanhill and Kalma, 1994; Stanhill and Moresh-et, 1994; De Bruin et al., 1995; Stanhill, 1995; Stanhill and Gohen, 1997; Stanhill and Lanetz, 1997; Gilgen et al., 1998; Stanhill, 1998; 张雪芬等, 1998; Stanhill and Cohen, 2001) 利用观测资料发现, 除澳大利亚、荷兰以外世界各地地面太阳总辐射都有明显的下降趋势。对于中国太阳辐射资料的分析研究 (查良松, 1996; 李晓文等, 1998; 肖锋, 2005; 陈志华等, 2005) 发现, 中国大部分地区的太阳总辐射和直接辐射呈减少趋势, 并推测大气中悬浮粒子浓度的增加可能是造成这种趋势的主要原因之一。

随着科学技术的不断发展, 植物光合作用及作物生长模型的模拟、太阳电池的寿命和工作状态、大气污染的监测等需要都对太阳辐射的观测和研究提出了新的要求。尤其是在研究区域或全球生态系统碳循环以及农业生长模拟和产量预测方面, 对太阳辐射量变化特征的需求愈加迫切, 这就要求探讨运用常规气象资料推算出太阳日总辐射的方法。由于我国国内太阳总辐射观测站相对较少, 且影响太阳总辐射的因子较多 (如气溶

胶、CO₂浓度、水汽含量等)，同时这些因素在较大的空间范围上差异较大，仅仅用有限的辐射观测站的资料无法对我国太阳总辐射的分布规律及变化特征进行详细的刻画；而小皿蒸发数据在一般气象站就有观测。从空气动力学和能量平衡的角度出发，Penman (1948) 提出了 Penman 公式，之后该公式已经被广泛地应用在蒸发量的计算中，且在全球范围内取得的较高的模拟；因此，本文基于 Penman 公式，结合 6 种计算净长波辐射的方法推导出太阳总辐射的计算公式，再利用常规气象站的小皿蒸发量及其对应的气象观测数据，计算出各站的太阳总辐射；分析其在江西省的适用性，力图找出适用于江西省的太阳总辐射的计算方法；其次，分析江西省多年来太阳总辐射的变化特征。

2 资料与方法

2.1 区域概况

江西省处于北回归线附近，地势狭长，南北气候差异较大，但总体来看是春秋季节短而夏冬季长。全省气候温暖，平均气温 18℃ 左右；日照充足，年均日照时数为 1473.3~2077.5 h；雨量充沛，年均降水量为 1341~1940 mm，一般表现为南多北少、东多西少、山区多盆地少；无霜期长，为亚热带湿润气候，十分有利于农作物生长。丰富的地表水资源，为江西省的一大潜在优势。河川多年平均径流总量 $1.385 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，折合平均径流深 828 mm，径流总量居全国第七位。按人口平均居全国第五位，按耕地平均居全国第六位。约相当全国亩均占有水量的二倍。江西河川径流总量虽然丰富，但季节和年际变化较大，地区分布有差异。

2.2 资料处理

本文所用资料为 1961~2000 年江西省 78 个气象站（站点分布见图 1）20 cm 口径蒸发皿蒸发量及南昌站、赣州站太阳总辐射的观测资料。蒸发皿蒸发量资料的缺测时间均不大于 1 年。对于连续缺测时间小于等于 15 天的资料，用线性插值法替换缺测值；对于连续缺测时间大于 15 天的资料，在计算月平均值时该月月平均值记为缺测。在月平均值的基础上，对于缺测时间小于等于 1

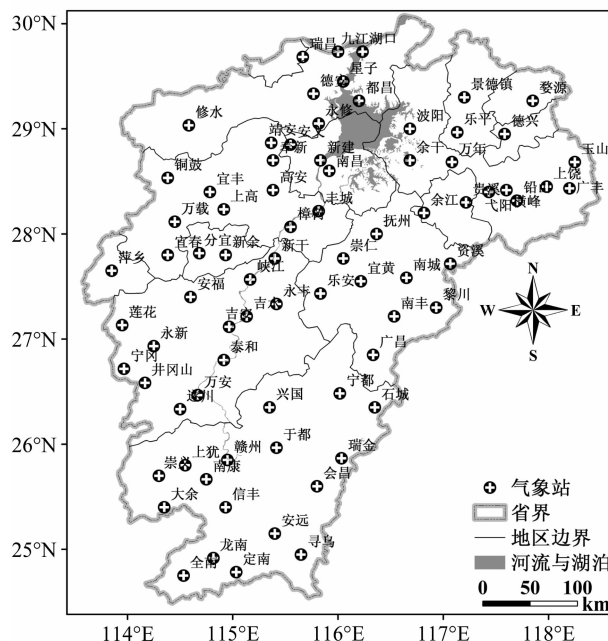


图 1 江西省 78 个气象站分布图

Fig. 1 The 78 weather stations used in Jiangxi Province

年的资料，用该站该月月平均值替换。南昌站及赣州站分别在 1967 年及 1992 年存在着长时间的缺测，故在求取太阳总辐射时，忽略 1967 年和 1992 年。

2.3 研究方法

2.3.1 气候变化率

将气候要素的趋势变化用一次线性方程表示，即： $\hat{x}_t = a_0 + a_1 t$, $t = 1, 2, \dots, n$ 。式中， $\hat{x}_t$ 为气象要素的拟合值； a_1 即为气候变化率，表示气候要素随时间的变化率。气象要素与时间的相关系数为 r_{xt} ，则 $r_{xt} \sqrt{n-2} / \sqrt{1-r_{xt}^2}$ 符合自由度 $n-2$ 的 t 分布，从而检验这种气候变化率是否有意义，还是一种随机振动（施能等，1995；申双和和盛琼，2008）。

2.3.2 平均相对误差和均方根误差

本文使用平均相对误差（RME）和均方根误差（RMSE）来评价各个拟合结果与实际观测值之间的误差。公式如下：

$$\text{RME} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{R_{S, \text{OBS}, i} - R_{S, \text{CAL}, i}}{R_{S, \text{OBS}, i}}}{n},$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{S, \text{OBS}, i} - R_{S, \text{CAL}, i})^2}{n}},$$

式中, $R_{S,OBS,i}$ 和 $R_{S,CAL,i}$ 分别表示第 i 年观测和估算的太阳总辐射, n 为 38 年。

2.3.3 太阳总辐射的计算

本文采用的太阳总辐射的公式如下:

$$R_s = \frac{1}{1-\alpha} \left[\frac{\lambda(\Delta+\gamma)K_p}{\Delta} E_p - \frac{\lambda\gamma}{\Delta} f(U_2)V_{PD} + R_{nl} \right] \quad (1)$$

式中, R_s 为太阳总辐射, 单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; E_p 为小皿蒸发, 单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$; K_p 为小皿转换系数, 本文参考文献 (Xu et al., 2006), 取为 0.67; α 是地面反照率, 取 0.23; Δ 为饱和水汽压曲线的斜率, 单位: $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; λ 为干湿表常数, 单位: $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; V_{PD} 为饱和水汽压差, 单位: kPa ; G 为天的时间尺度上的土壤热通量, 单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 相对较小可以忽略, 即 $G \approx 0$; $f(U_2)$ 为风速函数, 单位: $\text{mm} \cdot \text{kPa}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$;

U_2 为 2 m 风速, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; R_{nl} 为净长波辐射, 单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。各变量具体计算公式及说明见表 1。

3 Penman 公式估算结果与检验

3.1 基于 6 种净长波辐射方案估算的年太阳总辐射的比对

表 2 给出了基于 6 种净长波辐射方案估算的年太阳总辐射与实际观测值的误差分析, 发现: 对于赣州站和南昌站, 别尔良德法、布朗特法、P-M (FAO Penman-Monteith) 法的估算结果与实际观测值的相关系数皆通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验, RME 均为正 (小于 20%), RMSE 都在 $300 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上, 说明这 3 种方法的估算结果较实际观测偏大; 邓根云法的估算结果的 RME

表 1 公式具体参数

Table 1 The parameters of Penman equation

变量说明	方程	单位
饱和水汽压差	$V_{PD} = e_s - e_a$	kPa
饱和水汽压	$e_s = [e(T_{\max}) + e(T_{\min})] / 2$	kPa
实际水汽压	$e_a = \frac{R_H}{\frac{50}{e(T_{\max})} + \frac{50}{e(T_{\min})}}$	kPa
饱和水汽压曲线的斜率	$\Delta = \frac{409e}{(T_{\text{ave}} + 237.3)^2}$	$\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
干湿表常数	$\gamma = 0.161452p/\lambda$	$\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
汽化潜热	$\lambda = 2.501 - 0.002361T_{\text{ave}}$	$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
大气压	$p = 1010 - 0.115H + (0.00175H)^2$	hPa
2 m 风速	$U_2 = U_{10} \frac{4.87}{\ln(678 - 5.42)}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
风速函数	$f(U_2) = 2.7(1 + 0.864 U_2)$	$\text{mm} \cdot \text{kPa}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$
净长波辐射	童宏良法 (童宏良, 1989) $R_{nl} = \sigma (T_{\text{ave}} + 273.15)^4 (0.32 - 0.093\sqrt{W_\infty}) (0.43 + 0.57S)$ 别尔良德法 (卢兵, 1994) $R_{nl} = \sigma (T_{\text{ave}} + 273.15)^4 (0.39 - 0.058\sqrt{10e_a}) (0.1 + 0.9S)$ Penman 法 (刘钰等, 1997) $R_{nl} = \sigma (T_{\text{ave}} + 273.15)^4 (0.56 - 0.079\sqrt{10e_a}) (0.1 + 0.9S)$ 布朗特法 $R_{nl} = \sigma (T_{\text{ave}} + 273.15)^4 (0.56 - 0.092\sqrt{10e_a}) (0.1 + 0.9S)$ 邓根云法 (邓根云, 1979) $R_{nl} = \sigma (T_{\text{ave}} + 273.15)^4 (0.32 - 0.026\sqrt{10e_a}) (0.3 + 0.7S)$ FAO Penman-Monteith 法 (Allen et al., 1998) $R_{nl} = \frac{\sigma}{2} (T_{\text{ave}} + 273.15)^4 (0.34 - 0.014\sqrt{e_a}) (1.35 - \frac{0.25 + 0.5S}{0.75 + 2 \times 10^{-5}} - 0.35)$	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$

注: $e(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)$; $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 分别为最低温度、最高温度; T_{ave} 为平均温度, $T_{\text{ave}} = (T_{\max} + T_{\min})/2$; R_H 为相对湿度; H 为站点海拔高度, 单位: m; U_{10} 为 10 m 风速, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; W_∞ 为大气含水量, 单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^3$, $W_\infty = (0.1054 + 1.513e_a) \exp(0.00006H)$; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数。

表 2 基于 6 种净长波辐射方案估算的年太阳总辐射的误差分析
Table 2 Errors analysis on the calculation of the annual total solar radiation based on the six cases

	平均相对误差 (RME)		均方根误差 (RMSE) /MJ · m ⁻² · a ⁻¹		与观测的相关系数 (R)	
	赣州	南昌	赣州	南昌	赣州	南昌
童宏良法	0.80%	-8.25%	305.04	562.19	0.38*	0.54**
别尔良德法	16.90%	7.59%	835.15	573.82	0.45**	0.55**
Penman 法	2.99%	-6.68%	315.94	537.48	0.54**	0.56**
布朗特法	13.53%	3.45%	688.99	482.34	0.50**	0.55**
邓根云法	-5.50%	-14.00%	375.49	754.71	0.45**	0.55**
P-M 法	27.97%	19.32%	1326.07	993.5	0.32*	0.54**

*, ** 分别表示通过了 $\alpha=0.05$ 、 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

均为负，RMSE 在 370 MJ · m⁻² · a⁻¹ 以上，表明该方法的估算结果较观测值偏小；在赣州站，童宏良法和 Penman 法的估算结果相对于观测值分别表现为偏小。而在南昌站，童宏良法和 Penman 法的估算结果分别表现为偏大。

就 RME 和 RMSE 而言，赣州站童宏良法的估算结果相对最理想；南昌站，最为理想的方法为布朗特法。表 3 给出了观测、童宏良法、布朗特法估算结果随时间变化的趋势系数，可以发现：46 年来赣州站、南昌站观测的年太阳总辐射均呈下降趋势，下降速率分别为 -10.78 MJ · m⁻² · a⁻²、-31.48 MJ · m⁻² · a⁻²；对于赣州站，童宏良法与布朗特法的估算的太阳辐射呈上升趋势，上升速率分别为 3.66 MJ · m⁻² · a⁻²、1.07 MJ · m⁻² · a⁻²，与实际观测的太阳总辐射变化趋势相反；对于南昌站，童宏良法与布朗特法的估算的太阳辐射呈下降趋势，速率分别为 -27.17 MJ · m⁻² · a⁻²、-29.56 MJ · m⁻² · a⁻²，与实际观测结果较为接近。

表 3 观测、童宏良法、布朗特法估算结果随时间变化的趋势系数

Table 3 The trends of the annual total solar radiation from observation, Tong Hongliang case, and Brunt case

站点	MJ · m ⁻² · a ⁻²		
	观测	童宏良法	布朗特法
赣州	-10.78	3.66	1.07
南昌	-31.48	-27.17	-29.56

3.2 权重系数的确定

本文的研究重点为 1961~2000 年江西省年太

阳总辐射的变化特征，而对于赣州站童宏良法、P-M 法估算的年太阳总辐射变化趋势与实际观测趋势相反。因此，有必要找出一种在江西省较为适用的年太阳总辐射的估算方法。考虑到 6 种净长波辐射方法中，有些方法的估算结果偏大，有些方法估算结果偏小，所以本文拟采用绝对误差加权的方法，将赣州站、南昌站 6 种方法的估算结果与实际观测的年太阳总辐射建立关系，求取各年份的 6 种方法的权重系数。

故可设童宏良法、别尔良德法、Penman 法、布朗特法、邓根云法、P-M 法的估算值分别为 $R_{ns,CAL-1}$ 、 $R_{ns,CAL-2}$ 、 $R_{ns,CAL-3}$ 、 $R_{ns,CAL-4}$ 、 $R_{ns,CAL-5}$ 、 $R_{ns,CAL-6}$ ，与观测值的绝对误差可以分别记为 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 、 d_6 ，权重系数分别记为 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 。绝对误差可以表示为： $d_i = |R_{ns,OBS} - R_{ns,CAL-i}|$ ， $i=1, 2, \dots, 6$ ，则：

$$a_i = \frac{1}{d_i} / \sum_{j=1}^6 \frac{1}{d_j}, i = 1, 2, \dots, 6, \quad (2)$$

$$R_{ns,CAL} = R_{ns,CAL-1} \times a_1 + R_{ns,CAL-2} \times a_2 + R_{ns,CAL-3} \times a_3 + R_{ns,CAL-4} \times a_4 + R_{ns,CAL-5} \times a_5 + R_{ns,CAL-6} \times a_6. \quad (3)$$

通过 (2) 式可以求得每年的权重系数 (见附表)，最后由 (3) 式可以计算出每年的太阳总辐射。

图 2 为绝对误差权重法估算的赣州、南昌年太阳总辐射散点图，结合表 4，可以发现：对于赣州站，绝对误差权重法估算的年太阳辐射的误差较小，且变化趋势呈下降趋势，为 -5.60 MJ · m⁻² · a⁻²，估算结果与实际观测靠近 1:1 线，相关系数为 0.92，通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验；对于南昌

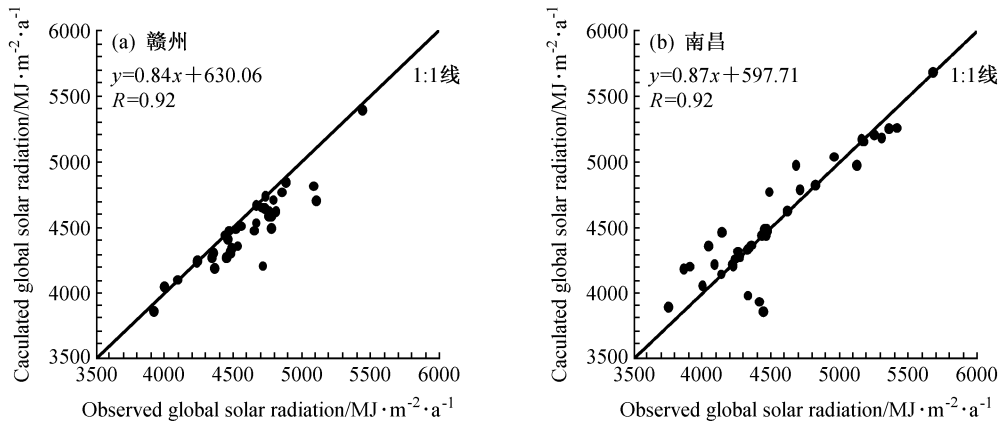


图2 利用权重系数法估算的赣州、南昌年太阳总辐射散点图: (a) 赣州; (b) 南昌

Fig. 2 The scatter plot of the annual total solar radiation with the method of MAE in Jiangxi Province: (a) Ganzhou; (b) Nanchang

站, 绝对误差权重法估算的年太阳辐射变化趋势呈下降趋势, 为 $-32.20 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$, 估算结果绝对值略大于实际观测, 相关系数为 0.92, 通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验。总之, 绝对误差权重法估算的年太阳总辐射的变化趋势与实际观测的变化趋势一致, 均呈下降的趋势。通过上述分析, 可以认为该方法能够有效的估算出江西省年太阳总辐射的变化趋势。

表4 绝对误差权重法误差分析及太阳总辐射变化趋势
Table 4 The errors analysis and the trends of calculation with MAE

站点	RME	RMSE/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	变化趋势/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$
赣州	2.48%	164.56	-5.60
南昌	-0.29%	190.99	-32.20

4 1961~2000 年江西省太阳总辐射变化特征

4.1 1961~2000 年江西省太阳总辐射分布特征

图3给出了江西省年太阳总辐射的空间分布。1960年代(图3a), 大部分地区太阳总辐射在 $4200 \sim 4800 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 北部及南部地区总辐射相对较大, 各有一个高值中心; 中部地区相对较小。1970年代(图3b), 大部分地区太阳总辐射在 $3800 \sim 4200 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 北部及南部偏东地区总辐射相对较大, 各有一个高值中心;

中部及南部偏西地区相对较小。1980年代(图3c), 大部分地区太阳总辐射在 $3600 \sim 4000 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 西部及北部偏东地区总辐射相对较小, 范围在 $3154.32 \sim 3400 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 南部偏东地区相对较大。1990年代(图3c), 大部分地区太阳总辐射在 $3800 \sim 4200 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 南部偏东地区总辐射相对较大, 范围在 $4200 \sim 4800 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 北部偏东地区相对较小, 而西部地区太阳总辐射为最小。1961~2000年(图3d), 江西省大部分地区太阳总辐射在 $3800 \sim 4400 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 南部偏东地区与鄱阳湖的东西两侧地区分别为太阳总辐射最高及次高区, 西部地区则为江西省太阳总辐射最小的地区, 这与王炳忠等(1980)研究结果基本一致。

4.2 1961~2000 年江西省太阳总辐射变化趋势

由表5, 可以发现: 在江西省平均情况下, 1961~2000年江西省太阳总辐射为 $4022.41 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 1960年代至1980年代, 太阳总辐射是逐渐下降的, 且在1980年代达到最低, 为 $3697.31 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 相对于1960年代下降了 $667.07 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 约15.28%; 1990年代相对于1980年代有所上升, 为 $4002.94 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。图4给出了江西省逐年太阳总辐射变化曲线, 图中直线为太阳总辐射与时间序列(年)拟合的趋势线, 通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验; 由图4可看出: 江西省年太阳总辐射呈明显下降趋势, 每10年减少 $143.37 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。1979年以前太阳总辐射基本高于40年平均值,

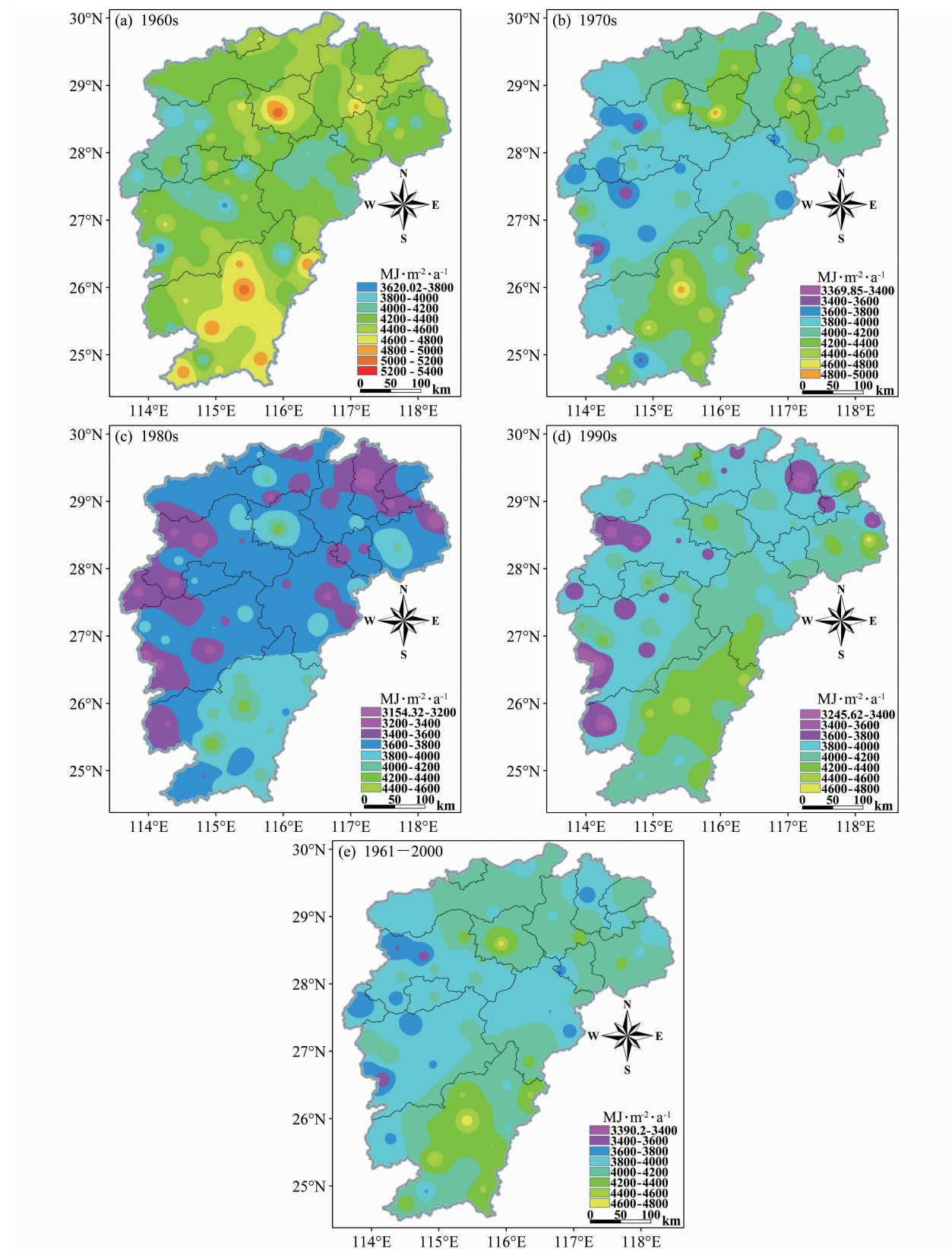


图3 江西省年太阳总辐射空间分布: (a) 1960年代; (b) 1970年代; (c) 1980年代; (d) 1990年代; (e) 1961~2000年
Fig. 3 The spatial distribution of the solar radiation of Jiangxi Province: (a) The 1960s; (b) the 1970s; (c) the 1980s; (d) the 1990s; (e) 1961 – 2000

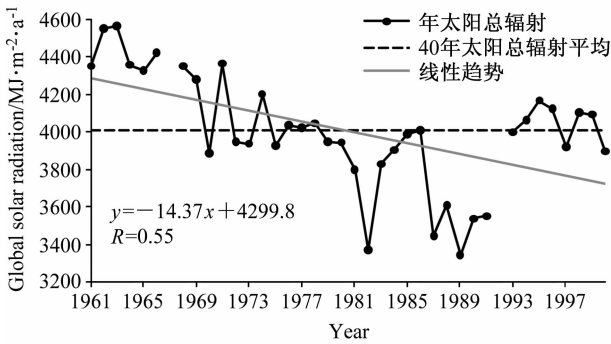


图4 江西省逐年太阳总辐射变化曲线

Fig. 4 The variation curve of the annual total solar radiation in Jiangxi Province

1979~1993 年基本低于 40 年平均水平, 1994 年开始有所回升。

表5 江西省各年代太阳总辐射

Table 5 The solar radiation of different periods in Jiangxi Province

太阳总辐射/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	
1960 年代	4364.38
1970 年代	4057.26
1980 年代	3697.31
1990 年代	4002.94
1961~2001 年	4022.41

从本文计算太阳总辐射的公式 (1) 出发, λ 、 Δ 和 γ 变化较小, 故太阳总辐射的计算主要与蒸发量 (E_p)、风速 (U_2)、饱和水汽压差 (V_{PD})、日照百分率 (S) 和平均温度 (T_{ave}) 有关。孙善磊等 (2010) 指出, 江西省 1961~2005 年间蒸发皿年蒸发量 (E_p) 呈下降趋势; $\frac{\lambda\gamma}{\Delta} f(U_2) V_{PD}$ 也呈下降趋势 ($< E_p$ 的下降趋势); 虽然平均温度有所上升, 但是日照百分率的下降幅度更大, 使得 R_{nl} 呈下降的趋势; 因此, R_s 在江西省呈下降的趋势。从太阳总辐射传输机理上讲, 到达地面的太阳总辐射主要有直接太阳辐射及天空散射辐射; 白建辉和王庚辰 (1994) 指出影响直接辐射和散射辐射的因子主要有大气物理因子、气象因子等。罗云峰等 (2002) 指出 1961~1990 年随着城市化进程的加剧, 我国大部分地区的大气光学厚度增加, 尤其是长江中下游地区, 说明大气中的气溶胶粒子增加; 另一方面, 江西省 40 年间大气中水

汽含量、日照百分率分别呈现增加和下降的趋势; 因此, 使得到达地面的太阳总辐射减少。

由表 6 可以看出, 1961~2000 年间, 江西省 78 站中, 70 站的年太阳总辐射为下降趋势, 占总站数的 89.74%, 其中 63 的站通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验, 其中, 又以玉山站的下降趋势最为显著, 为 $-36.81 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$; 8 个站的年太阳总辐射表现为上升趋势, 为总站数的 10.26%, 其中, 横峰站、新干站、宁都站的上升趋势通过了 $\alpha=0.05$ 的信度检验, 上升速率分别为 13.17、8.43、12.43 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$ 。

表6 江西省 78 站太阳总辐射变化趋势统计

Table 6 The statistics of trends of the 78 stations' annual total solar radiation in Jiangxi Province

变化趋势	站数	占总站数百分比	通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验	
			站数	占总站数百分比
上升	8	10.26%	3	3.85%
下降	70	89.74%	63	80.77%

图 5 为江西省 1961~2000 年太阳总辐射变化趋势的空间分布图, 可以发现: 40 年间, 大部分地区太阳总辐射均表现为下降; 北部及南部

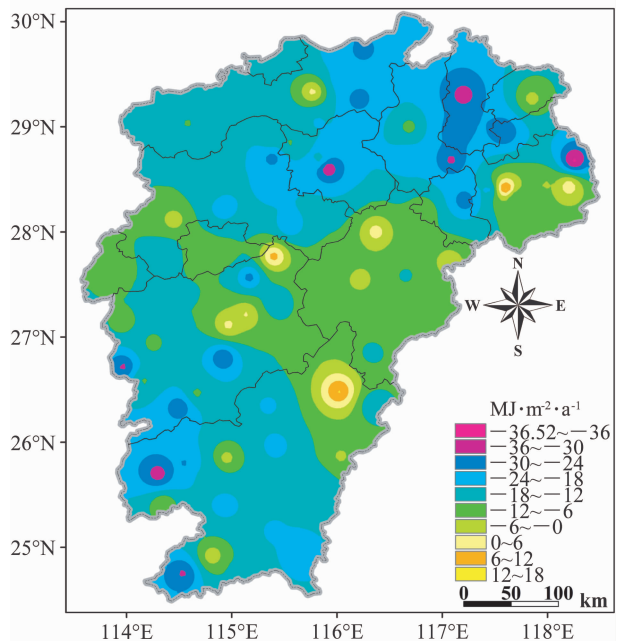


图5 1961~2000 年江西省太阳总辐射变化趋势空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of trend of the annual total solar radiation in Jiangxi Province

地区太阳总辐射下降较大, 介于 $-36.52 \sim -12 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$ 之间; 中部地区下降相对较小, 且有小部分地区存在上升的趋势; 在鄱阳湖东侧有一下降高值中心; 而东部有些地区呈现上升趋势。

5 结论与讨论

本文利用 1961~2000 年赣州站、南昌站的年太阳总辐射与相关气象要素资料, 结合 Penman 公式和 6 种净长波辐射的方法分别估算了赣州、南昌的太阳总辐射, 并对 Penman 公式进行了检验、订正, 利用订正的 Penman 公式估算了江西省年太阳总辐射的时空分布特征及其变化趋势, 得到如下结论: (1) 童宏良法与布朗特法可以较好的估算赣州站和南昌站的年太阳总辐射; 但是在估算年太阳总辐射随时间变化的趋势时, 赣州站太阳总辐射随时间的变化趋势呈上升, 与实际观测的下降趋势相反。结合赣州站、南昌站的逐年太阳总辐射资料, 通过绝对误差权重的方法得出了适用于江西省的年太阳总辐射的绝对误差权重系数, 详见附表; 运用该方法, 赣州站 40 年间观测和估算的太阳总辐射变化趋势分别为 $10.78 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$ 和 $-5.60 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$, 南昌站分别为 $-31.48 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$ 和 $-32.20 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$; (2) 1961~2000 年, 江西省大部分地区太阳总辐射在 $3800 \sim 4400 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 南部偏东地区与鄱阳湖的东西两侧地区分别为太阳总辐射最高及次高区, 西部地区则为江西省太阳总辐射最小的地区; (3) 1961~2000 年, 江西省年太阳总辐射呈明显下降趋势, 每 10 年减少 $143.70 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。1979 年以前太阳总辐射基本高于 40 年平均值, 1979~1993 年基本低于 40 年平均水平, 1994 年开始有所回升; 78 站中, 有 80.77% 的站点的下降趋势通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验, 其中, 玉山站的下降趋势最为显著, 为 $-36.81 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$; 8 个站的太阳总辐射表现为上升趋势。40 年间, 江西省北部及南部地区太阳总辐射下降较大, 下降趋势范围在 $-36.52 \sim -12 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$ 之间; 中部地区下降相对较小, 且有小部分地区存在上升的趋势; 在鄱阳湖东侧有一下降高值中心。

赵东等 (2009) 指出我国大部分地区太阳直

接辐射资源在 20 世纪 60 至 80 年代呈下降趋势, 自 90 年代初期开始, 下降趋势基本停止, 甚至略有增强; 辐射变化具有明显的区域差异, 减少主要出现在我国东部和东南部地区。杨胜朋等 (2007) 研究得出大部分区太阳总辐射自 20 世纪 60 年代开始呈现减少的趋势, 这一趋势一直持续到 1990 年前后, 其后大部分地区总辐射有明显增加的趋势; 同时指出我国太阳总辐射的线性倾向为 $-10.58 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$, 降幅最大的地区在我国东部, 达到 $-16.75 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$ 。李晓文等 (1998) 通过对全国 55 个辐射站点 1961~1990 年地面太阳辐射变化趋势的统计分析, 也发现全国大部分地区地面总辐射量近 30 年来呈下降趋势。这些结论与本文的研究结果基本一致; 因此, 可以佐证本文的研究方法及结果是切实可行的。同时, 本文发现: 在太阳总辐射下降的大的背景下, 少部分地区太阳总辐射却呈上升趋势, 可以说明太阳总辐射的分布和变化具有明显的区域差异性。但是, 由于缺少足够的地面辐射资料, 大部分研究无法对较小区域内太阳总辐射的分布及变化趋势进行详尽的刻画。而本文从 Penman 公式出发, 利用常规气象站的小皿蒸发量推算各站的太阳总辐射, 可以为研究小区域内太阳总辐射的分布及变化趋势提供一个可用且有效的手段。

另一方面, 本文还使用 Angström (1922) 提出的太阳总辐射的气候计算公式, 分别计算了赣州站和南昌站的 a 、 b 系数, 两站的年太阳总辐射与观测值的相关系数都在 0.9 以上, RMSE 均在 $150 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下。但是当使用交叉验证的方法对 a 、 b 系数验证时 [即利用赣州站 (南昌站) 的 a 、 b 系数, 求得南昌站 (赣州站) 年太阳总辐射], 其估算值和观测值的相关系数都在 0.8 以下, RMSE 都在 $400 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上。同时发现: 1960~2000 年, 赣州站和南昌站的系数 a 均呈上升趋势, 分别为 0.0021 ($\alpha=0.05$)、0.008; 而系数 b 均呈下降趋势, 分别为 -0.0005 、 -0.0021 ($\alpha=0.05$), 其主要原因可能是由于两个地区的城市发展状况不同, 使得大气中的气溶胶等含量存在较大的地区差异, 从而在交叉检验时效果较差。因此, 可以说明该方法在估算年太阳总辐射时存在较大的空间变异性, 并不适合对整个江西省的太阳总辐射进行估算。

参考文献 (References)

- Allen R G, Pereira L S, Raes D S, et al. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements [M]. Roman: FAO Irrigation and Drainage, 41-56.
- Angström A. 1922. Archiv fur Matemat [J]. Astronomy and Physik, 17 (15): 1-7.
- 白建辉, 王庚辰. 1993. 北京地区太阳紫外辐射的基本特征 [J]. 太阳能学报, 14 (3): 245-250. Bai Jianhui, Wang Gengchen. 1993. The basic characteristics of the solar ultra-violet radiation over the Beijing district [J]. Acta Energiae Solaris Sinica (in Chinese), 14 (3): 245-250.
- 白建辉, 王庚辰. 1994. 影响太阳总辐射各主要因子的分析 [J]. 高原气象, 13 (4): 485-488. Bai Jianhui, Wang Gengchen. 1994. The analysis for the primary factors affecting the solar global radiation [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 13 (4): 485-488.
- Bristow K L, Campbell G S. 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 31: 159-166.
- 陈志华, 石广玉, 车慧正. 2005. 近 40 年来新疆地区太阳辐射状况研究 [J]. 干旱区地理, 28 (6): 734-739. Chen Zhihua, Shi Guangyu, Che Huizheng. 2005. Analysis of the solar radiation of Xinjiang uygur autonomous region in recent 40 years [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 28 (6): 734-739.
- De Bruin H, Van Den H B, Welgraven D. 1995. A series of global radiation at Wageningen for 1928-1992 [J]. International Journal of Climatology, 15: 1253-1272.
- 邓根云. 1979. 水面蒸发量的一种气候学计算方法 [J]. 气象学报, 37 (3): 87-96. Deng Genyun. 1979. A climatic calculative method of evaporation from open water [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 37 (3): 87-96.
- Gilgen H, Wild M, Ohmura A. 1998. Means and trends of short-wave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data [J]. J. Climate, 11: 2042-2061.
- Grabbe G C, Grassl H. 1994. Solar radiation in Germany observed trends and an assessment of the causes. Part II: Detailed trend analysis for Hamburg [J]. Beitrage zur Physik der Atmosphaere, 67 (1): 31-37.
- Hay J E. 1984. An assessment of the mesoscale variability of solar radiation at the Earth's surface [J]. Solar Energy, 32 (3): 425-434.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: the Scientific Basis. Summary for Policymakers and Technical Summary of Working Group I Report [C]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kasten F, Czeplak G. 1980. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount of type of cloud [J]. Solar Energy, 24: 177-189.
- Kimball H H. 1928. Solar and sky radiation measurements during November, 1928 [J]. Mon. Wea. Rev., 56: 468-469.
- Lam J, Li D. 1998. Correlation analysis of solar radiation and cloud cover [J]. International Journal of Ambient Energy, 19: 187-198.
- 刘钰, Pereira L S, Teixeira J L. 1997. 参考蒸散量的新定义及计算方法对比 [J]. 水利学报, 6 (1): 27-33. Liu Yu, Pereira L S, Teixeira J L. 1997. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method [J]. Journal of Hydraulic Engineering (in Chinese), 6 (1): 27-33.
- 李晓文, 李维亮, 周秀骥. 1998. 中国近 30 年太阳辐射状况研究 [J]. 应用气象学报, 9 (1): 24-31. Li Xiaowen, Li Weiliang, Zhou Xiuji. 1998. Analysis of the solar radiation variation of China in recent 30 years [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9 (1): 24-31.
- Louis E A, Sunday O U, Sunday E. 2004. Empirical correlations of global solar radiation with meteorological data for Onne, Nigeria [J]. Turkish Journal of Physics, 28: 205-212.
- 卢兵. 1994. 鄱阳湖水面蒸发量计算方法探析 [J]. 江西水利科技, 20 (4): 347-353. Lu Bing. 1994. Probe into the calculating method of evaporation capacity in Poyang Lake [J]. Jiangxi Hydraulic Science and Technology (in Chinese), 20 (4): 347-353.
- 罗云峰, 吕达仁, 周秀骥, 等. 2002. 30 年来我国大气气溶胶光学厚度平均分布特征分析 [J]. 大气科学, 26 (6): 721-730. Luo Yunfeng, Lü Daren, Zhou Xiuji, et al. 2002. Analysis on the spatial distribution Aerosol optical depth over China in recent 30 years [J]. Chinese of Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 26 (6): 721-730.
- Muneer T, Gul M. 2000. Evaluation of sunshine and cloud cover based models for generating solar radiation data [J]. Energy Conversion Management, 41: 461-482.
- Penman H L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. Proc. Roy. Soc. London, 193: 120-145.
- Russak V. 1990. Trends of solar radiation, cloudiness and atmospheric transparency during recent decades in Estonia [J]. Tellus, 42: 206-210.
- 申双和, 盛琼. 2008. 45 年来中国蒸发皿蒸发量的变化特征及其成因 [J]. 气象学报, 66 (3): 452-460. Shen Shuanghe, Sheng Qiong. 2008. Changes in pan evaporation and its cause in China in the last 45 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (3): 452-460.
- 施能, 陈家其, 屠其璞. 1995. 中国近 100 年 4 个年代际的气候变化特征 [J]. 气象学报, 53 (4): 431-439. Shi Neng, Chen Jiaqi, Tu Qipu. 1995. Four-phase climate change features in the last 100 years over china [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 53 (4): 431-439.
- Stanhill G. 1995. Solar irradiance, air pollution and temperature changes in the Arctic [J]. Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 352: 247-258.

- Stanhill G. 1998. Long-term trends in, and spatial variation of, solar irradiances in Ireland [J]. *Int. J. Climatol.*, 18 (9): 1015–1030.
- Stanhill G, Cohen S. 1997. Recent changes in solar irradiance in Antarctica [J]. *J. Climate*, 10: 2078–2086.
- Stanhill G, Cohen S. 2001. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107: 255–278.
- Stanhill G, Ianetz A. 1997. Long-term trends in, and the spatial variation of global irradiance in Israel [J]. *Tellus*, 49: 112–122.
- Stanhill G, Kalma J D. 1994. Secular variation of global irradiance in Australia [J]. *Australian Meteorology Magazine*, 43: 81–86.
- Stanhill G, Moreshet S. 1994. Global radiation climate change at seven sites remote from surface sources of pollution [J]. *Climatic Change*, 26: 89–103.
- Suckling P W. 1985. Estimating daily solar radiation values in selected mid-latitude regions by extrapolating measurements from nearby stations [J]. *Solar Energy*, 35: 491.
- 孙善磊, 周锁铨, 宋洁, 等. 2010. 江西省域蒸发皿蒸发量变化特征及其成因 [J]. *农业工程学报*, 26 (9): 59–65. Sun Shanlei, Zhou Suoquan, Song Jie, et al. 2010. Change in pan evaporation and its driving factors in Jiangxi Province [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (in Chinese)*, 26 (9): 59–65.
- Thornton P E, Running S W. 1999. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity and precipitation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93: 211–228.
- 童宏良. 1989. 我国蒸发力计算的气候学方法 [J]. *南京气象学院学报*, 12 (1): 20–33. Tong Hongliang. 1989. A climatic calculation method for the evaporation power in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 12 (1): 20–33.
- 王炳忠. 1980. 我国的太阳能资源及其计算 [J]. *太阳能学报*, 1 (1): 1–9. Wang Bingzhong. 1980. Solar energy resources in China [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica (in Chinese)*, 1 (1): 1–9.
- 翁笃鸣. 1964. 试论总辐射的气候学计算方法 [J]. *气象学报*, 34 (3): 304–315. Weng Duming. 1964. Discuss on the climatological calculation method of the monthly global solar radiation [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 34 (3): 304–315.
- 肖锋. 2005. 佳木斯市 40 年太阳辐射变化规律及分析 [J]. *黑龙江气象*, 1: 24–25. Xiao Feng. 2005. Evolution and analysis of global solar radiation over Jiamusi in the past 40 years [J]. *Heilongjiang Meteorology (in Chinese)*, 1: 24–25.
- Xu C Y, Gong L B, Jiang T, et al. 2006. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 327: 81–93.
- 杨胜朋, 王可丽, 吕世华. 2007. 近 40 年来中国大陆总辐射的演变特征 [J]. *太阳能学报*, 28 (3): 227–232. Yang Shengpeng, Wang Keli, Lü Shihua. 2007. Regional characteristics of global solar radiation evolution in China over recent 40 years [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica (in Chinese)*, 28 (3): 227–232.
- Zelenka A, Lazic D. 1987. Supplementing network global irradiance data [J]. *Advances in Solar Energy Technologies. Proceedings 1987 Biennial Congress ISES*, 4: 3861–3865.
- Zelenka A. 1985. Satellite versus observation based model for global irradiation [J]. In *INTERSOL 85, Proceedings of the 9th Biennial Congress ISES*, 4: 2513.
- 查良松. 1996. 我国地面太阳辐射量的时空变化研究 [J]. *地理科学*, 16 (3): 232–237. Zha Liangsong. 1996. A study on spatial and temporal variation of solar radiation in China [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 16 (3): 232–237.
- 赵东, 罗勇, 高歌, 等. 2009. 我国近 50 年来太阳直接辐射资源基本特征及其变化 [J]. *太阳能学报*, 30 (7): 946–952. Zhao Dong, Luo Yong, Gao Ge, et al. 2009. Essential characteristics of solar direct radiation over recent 50 years in China (in Chinese) [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica (in Chinese)*, 30 (7): 946–952.
- 张雪芬, 陈东, 付祥健, 等. 1998. 河南省近 40 年太阳辐射变化规律及其成因探讨 [J]. *气象*, 25 (3): 21–25. Zhang Xuefen, Chen Dong, Fu Xiangjian, et al. 1998. Analysis of the regularity and forming reasons of the solar radiation variation of Henan in recent 40 years [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 25 (3): 21–25.
- 朱志辉. 1982. 太阳辐射时空分布的多因子计算 [J]. *地理学报*, 37 (1): 27–34. Zhu Zhihui. 1982. Multi-factors calculation on the temporal and spatial distribution of solar radiation [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 37 (1): 27–34.

附表 绝对误差权重系数
Appendix Coefficients of MAE

年份	童宏良法	别尔良德法	Penman 法	布朗特法	邓根云法	P-M 法
1961	0.8798	0.0100	0.0660	0.0123	0.0259	0.0060
1962	0.1280	0.0373	0.1806	0.0491	0.5825	0.0225
1963	0.1409	0.0419	0.3748	0.0575	0.3608	0.0241
1964	0.3981	0.0513	0.2215	0.0628	0.2343	0.0320
1965	0.1021	0.0308	0.0823	0.0374	0.7271	0.0204
1966	0.2188	0.0466	0.1929	0.0598	0.4532	0.0286
1967						
1968	0.2825	0.0505	0.1799	0.0622	0.3929	0.0320
1969	0.3176	0.0513	0.2264	0.0655	0.3078	0.0314
1970	0.6141	0.0377	0.1779	0.0467	0.1004	0.0232
1971	0.3743	0.0829	0.2543	0.1430	0.1063	0.0392
1972	0.2219	0.0751	0.4666	0.1075	0.0900	0.0389
1973	0.0596	0.0091	0.8982	0.0125	0.0156	0.0050
1974	0.2233	0.0202	0.6800	0.0280	0.0375	0.0110
1975	0.7317	0.0264	0.0999	0.0318	0.0935	0.0167
1976	0.2659	0.0931	0.3433	0.1465	0.1056	0.0456
1977	0.2615	0.0614	0.4671	0.0914	0.0868	0.0318
1978	0.1176	0.1678	0.1212	0.4688	0.0673	0.0573
1979	0.0328	0.0723	0.0326	0.8224	0.0200	0.0199
1980	0.2428	0.1017	0.3422	0.1587	0.1052	0.0494
1981	0.1884	0.1366	0.2863	0.2247	0.1016	0.0623
1982	0.0053	0.0189	0.0072	0.9600	0.0038	0.0048
1983	0.0805	0.1672	0.0928	0.5578	0.0500	0.0517
1984	0.2281	0.0901	0.4102	0.1289	0.0969	0.0458
1985	0.2839	0.0379	0.5392	0.0479	0.0692	0.0219
1986	0.0366	0.0653	0.0339	0.8235	0.0218	0.0189
1987	0.0136	0.8844	0.0156	0.0563	0.0100	0.0201
1988	0.0217	0.8233	0.0243	0.0826	0.0160	0.0321
1989	0.0095	0.9133	0.0121	0.0425	0.0073	0.0153
1990	0.0328	0.2070	0.0431	0.6563	0.0233	0.0374
1991	0.0371	0.5546	0.0486	0.2808	0.0276	0.0513
1992						
1993	0.2631	0.0471	0.1879	0.0617	0.4115	0.0289
1994	0.2161	0.0420	0.1082	0.0484	0.5567	0.0285
1995	0.3062	0.0498	0.2222	0.0650	0.3265	0.0303
1996	0.3124	0.0497	0.1789	0.0622	0.3656	0.0312
1997	0.2002	0.0339	0.0815	0.0398	0.6216	0.0231
1998	0.1635	0.0480	0.6414	0.0615	0.0593	0.0263
1999	0.8028	0.0139	0.1179	0.0185	0.0387	0.0081
2000	0.3829	0.0538	0.3597	0.0656	0.1056	0.0325

注：由于 1967 和 1992 年 太阳辐射缺测，故未计算这两年的绝对误差权重系数。