doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.028

基于云模型的西北地区辐射时空分布研究

关　静[1,2]　梁　川[1,2]　赵　璐[1,2]　崔宁博[1,2]　王春懿[1,2]　姜守政[1,2]

(1. 四川大学水利水电学院, 成都 610065; 2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 为研究西北地区辐射(R_s)时空分布特性,基于西北地区 16 个辐射站点 4 个分区(Ⅰ区,新疆北部、甘肃河西走廊中西段、宁夏中北部、内蒙古西部;Ⅱ区,新疆南部;Ⅲ区,青海省;Ⅳ区,甘肃东南部、宁夏南部、陕西关中地区与陕北地区)1995—2015 年实测日 R_s 与日照时数(n)率定 Ångström - Prescott(A - P)模型参数 a、b,使用 A - P 模型 4 种不同参数率定方法(M1:分月率定,M2:分季率定,M3:分半年率定,M4:多年率定),选取其中精度高且简便的方法计算 4 个分区 1961—2015 年共 55 a 的 R_s,并用云模型描述西北地区 R_s 时空分布特性,结果表明:各分区 4 种方法计算的 R_s 值与实测值在日尺度和月尺度上拟合结果均较好。各分区 4 种方法计算 R_s 的 RMSE、nRMSE 分布相似,MBE 略有差异,t 检验结果表明Ⅰ区和Ⅲ区使用 M1、M2、M3 计算的 R_s 值与实测值无明显差异,Ⅱ区使用 M1、M3 计算的 R_s 值与实测值无明显差异,Ⅳ区使用 M1、M2 计算的 R_s 值与实测值无明显差异。Ⅰ区 R_s 时间分布的不均匀性较小但不稳定,Ⅱ区、Ⅲ区 R_s 时间分布的不均匀性较小且较稳定,Ⅳ区 R_s 时间分布的不均匀性较大且不稳定。西北地区 R_s 空间分布不均匀,4 个季节均表现为Ⅲ区(青海省)R_s 较大;与 R_s 在时间上的分布特性相比,其在空间上的分布特性更不均匀、不稳定。该研究结果可用于构建完整的西北地区 R_s 时间序列,为西北地区 R_s 时空变化研究提供科学参考。

关键词: 日辐射; 西北地区; 日照时数; Ångström - Prescott 模型; 云模型

中图分类号: P422.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)12-0226-10

Characteristics of Temporal-spatial Solar Radiation Distribution in Northwest China Based on Cloud Model

GUAN Jing[1,2]　LIANG Chuan[1,2]　ZHAO Lu[1,2]　CUI Ningbo[1,2]　WANG Chunyi[1,2]　JIANG Shouzheng[1,2]

(1. *College of Water Resource and Hydropower*, *Sichuan University*, *Chengdu* 610065, *China*

2. *State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering*, *Sichuan University*, *Chengdu* 610065, *China*)

Abstract: In order to study the temporal-spatial distribution of solar radiation (R_s) in Northwest China, daily R_s of 16 stations in Northwest China from 1961 to 2015 were calculated by Ångström - Prescott (A - P) model, and cloud model was used to describe the temporal-spatial distribution of R_s in Northwest China. To obtain the best parameters calibrated method and assess its adaptability, Northwest China was divided into four areas. Ⅰ area included northern Xinjiang, middle and west section of Hexi Corridor of Gansu, central and northern Ningxia, western Inner Mongolia. Ⅱ area included southern Xinjiang. Ⅲ area included Qinghai. Ⅳ area included southeast Gansu, southern Ningxia, Guanzhong and northern Shaanxi. Daily climatic data radiation (R_s) and sunshine hour (n) of 16 stations from 1995 to 2015 were used to calibrate A - P model parameters, and four different parameters calibrated methods for A - P model were used, including monthly (M1), seasonally (M2), bi-annualy (M3) and annually (M4), in which high precision and simple calculation method for each area was finally selected to calculate R_s. The results showed that the fitting results of four parameters calibrated methods conformed the measured values well both in daily and monthly scales. RMSE and nRMSE of four parameters calibrated methods changed little. The values of t-statistic showed that there was no difference among the three methods (M1, M2 and

收稿日期: 2017 - 11 - 01　修回日期: 2017 - 12 - 17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400206 - 03)、国家自然科学基金面上项目(51779161)、"十二五"国家科技支撑计划项目(2015BAD24B01 - 01)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2016CDDY - S04 - SCU、2017XDLZ - N22)

作者简介: 关静(1993—),女,博士生,主要从事节水农业和水文气象研究,E-mail: guanjing_scu@163.com

通信作者: 赵璐(1986—),女,高级实验师,博士,主要从事节水农业和水文气象研究,E-mail: luya1121@163.com

M3) in use of data calculation in Ⅰ area and Ⅲ area, no difference between the two methods (M1 and M3) in use of data calculation in Ⅱ area, no difference between the two methods (M1 and M2) in use of data calculation in Ⅳ area. When cloud model was used to analyze the temporal-spatial distribution characteristics of R_s in Northwest China, as a consequence, there was good homogeneity but poor stability of R_s in Ⅰ area in the time. There was good homogeneity and stability of R_s in Ⅱ area and Ⅲ area in the time. There was poor homogeneity and stability of R_s in Ⅳ area in the time. Besides, spatial distribution of R_s in Northwest China was uneven. R_s of the four seasons in Ⅲ area (Qinghai Province) was larger than those of other areas. In general, the homogeneity and stability of R_s in the space was worse than that in the time. The results can be used to construct a complete R_s time series in Northwest China and provide a scientific reference for the study of temporal-spatial distribution characteristics of R_s in Northwest China.

Key words: solar radiation; Northwest China; sunshine hours; Ångström－Prescott model; cloud model

0　引言

地表总辐射量(R_s),即到达地球表面的太阳辐射量,是地球-大气系统能量平衡的关键因素[1-3],在作物生长模型、蒸散量估算、灌溉制度制定和气候变化研究等领域都有重要的科学价值和现实意义[4-7]。然而,由于建设和维护成本很高,辐射量观测受到很大限制,其数据并不像常规日照时数、气温等气象数据那样容易获得。我国西北地区地域辽阔,地形复杂,以高原、盆地和山地为主,由于下垫面形式多样,使得各地气候要素分布很不均匀,辐射条件存在较大差异[8-9]。

目前,西北地区共有 171 个气象站点,太阳辐射观测站点仅 35 个,尚在运行且连续观测 30 a 以上的站点仅 13 个,虽然经过非常严格的质量控制,但有观测条件的 R_s数据在时间序列上并不完整,数据缺失现象仍普遍存在。依靠这些稀疏且分布不均的站点的观测资料无法描述该地区 R_s时空变化特性。为解决 R_s观测资料不足的问题,学者们建立了多种估算 R_s的替代方法,如经验模型[5-7]、卫星图像[10]、随机天气模型[11]、机器学习[12]等方法。其中,基于日照时数的 Ångström－Prescott(A－P)模型[5-6]是国内外应用最广泛且精度较高的方法。

为提高 A－P 模型在预测 R_s方面的精度,许多学者对其参数取值、率定方法进行了诸多研究。其中,关于 A－P 模型是否应该分时段率定参数引起了国内外学者的广泛讨论。SOLER[13]发现在欧洲气候环境下使用 A－P 模型每月参数比固定一个参数估算 R_s精度更高;PODESTA 等[14]研究阿根廷潘帕斯高原辐射与日照关系后,建议使用月参数或者季度参数来避免时间规律造成的系统误差;HUSSAIN 等[15]研究发现 A－P 模型参数分夏半年(4—9 月)和冬半年(9—3 月)率定相比多年一次率定可提高 R_s预测精度;LI 等[16]发现,我国长江流域分月率定要略好于多年一次率定;然而 LIU 等[17]通过对我国温带季风气候下的 20 个站点研究发现,分时段率定 A－P 模型参数相比多年一次率定并不能提高 R_s预测精度。云模型是李德毅等[18]在传统模糊集理论和概率统计的基础上提出的一种定性定量不确定性的转换模型,目前已应用于降水量、参考作物蒸散量和干旱等的时空分布描述[19-21],而关于 R_s的时空分布描述还未提及。本文拟在前人研究基础上,基于西北地区 16 个辐射站点 4 个分区 1995—2015 年实测 R_s与日照时数(n)率定 A－P 模型参数 a、b,使用 A－P 模型 4 种不同参数率定方法(M1:分月率定,M2:分季率定,M3:分半年率定,M4:多年率定),选取其中精度高且简便的方法计算 4 个分区 1961—2015 年共 55 a 的 R_s,利用云模型来描述西北地区 R_s时空分布,以期为西北地区各分区 A－P 模型参数率定方法提供理论基础,提高 R_s预测精度,构建完整的 R_s时间序列。

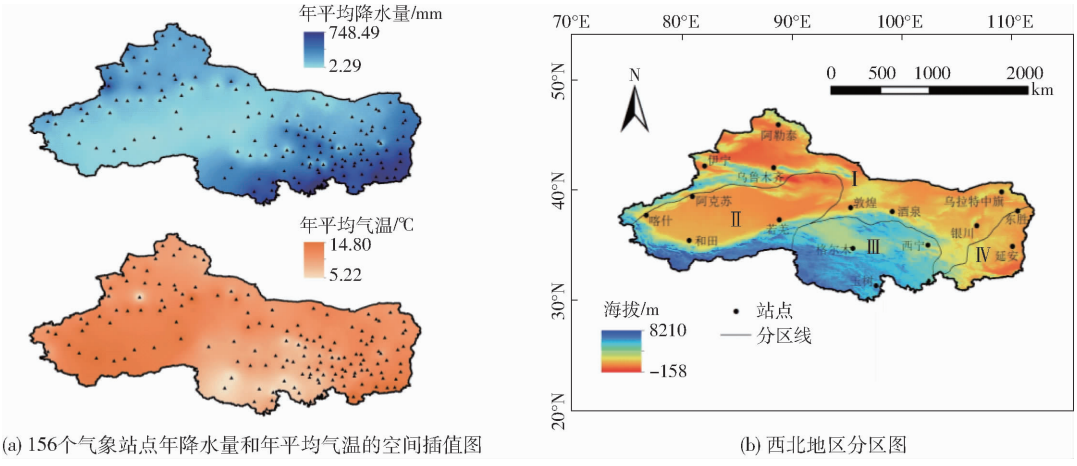
1　研究区域和资料

1.1　研究区域

中国西北地区位于 73°25′～110°55′E 和31°35′～49°15′N 之间,地处青藏高原北部和东北部,包括新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西(陕南除外)和内蒙古西部,总土地面积约为中国国土面积的1/3[22],是中国主要的干旱和半干旱区。该区地处大陆腹地,远离海洋,复杂的地形导致气候要素分布很不均匀,是生态环境极其脆弱的地区[8,22]。

系统聚类分析[23-24]是一种根据多种地学要素对地理实体进行划分类别的方法,其基本思想为距离最近的样本先聚成类,距离远的样本后聚成类,该过程一直进行下去,每个样本最终能聚到适当的类中。降水与气温是气候变化的主导因素,不同地区降水与气温的状况不同,气候特点也就不同[25]。故本文根据西北地区具有 30 a 以上观

测资料的 156 个气象站点的年平均降水量(P)和年平均气温(T)(其空间插值图如图 1a 所示),并采用欧氏距离和最远邻距离的方法对 156 个站点进行系统聚类分析,同时结合地形地貌,将西北地区划分为 4 个区域,得到西北地区分区图,如图 1b 所示。由图 1b 可以看出:Ⅰ区主要包括新疆北部、甘肃河西走廊中西段、宁夏中北部、内蒙古西部;Ⅱ区主要包括新疆南部;Ⅲ区主要为青海省;Ⅳ区主要包括甘肃东南部、宁夏南部、陕西关中地区与陕北地区。



(a) 156个气象站点年降水量和年平均气温的空间插值图　　(b) 西北地区分区图

图 1　西北地区气象站点分布

Fig. 1　Meteorological stations distribution in Northwest China

1.2　基础资料

结合资料系列的完整性和站点分布的均匀性,选取西北地区 16 个代表站点,其 1995—2015 年日辐射数据序列数据缺失率为 0.01% ~1.24%,平均缺失率 0.32%。站点基本情况如图 1b 和表 1 所示。气象数据来自中国气象数据共享服务网(http://data.cma.cn/site/index.html),包括 1995—2015 年逐日 R_s,1961—2015 年逐日 n。尽管数据发布前已经经过严格的质量控制,但仍存在部分数据缺失的情况,因此在使用前进行了如下处理:①在率定 A-P 参数时,如果 1995—2015 年实测 R_s 和 n 有 1 个缺失时,则删除该日所有数据。②如果 R_s/R_a(R_a 为大气层顶部所接收的太阳辐射量)或 n/N(N 为最大可能日照时数)大于 1,则删除该日全部数据。③利用 1961—2015 年 n 计算 R_s 时,对少量缺测数据 n 采用多年平均值法补全。

表 1　西北地区 16 个气象站点概况

Tab. 1　Summary of 16 meteorological stations in Northwest China

分区	站点	省份	纬度/(°)	经度/(°)	海拔/m	年平均降水量/mm	年平均气温/℃	日照时数/h	日总辐射/(MJ·(m²·d)⁻¹)
Ⅰ区	伊宁	新疆	43.95	81.33	662.5	276.00	9.19	8.11	14.79
	阿勒泰	新疆	47.73	88.08	735.3	197.10	4.54	8.26	14.98
	乌鲁木齐	新疆	43.78	87.65	935.0	265.33	7.26	7.31	14.39
	敦煌	甘肃	40.15	94.68	1 139.0	40.75	9.72	9.10	17.44
	酒泉	甘肃	39.77	98.48	1 477.2	88.45	7.53	8.44	16.59
	银川	宁夏	38.48	106.22	1 111.4	191.64	9.16	7.54	15.74
	乌拉特中旗	内蒙古	41.57	108.52	1 288.0	205.31	5.35	8.48	17.52
Ⅱ区	喀什	新疆	39.47	75.98	1 289.4	69.87	12.13	8.05	15.34
	阿克苏	新疆	41.17	80.23	1 103.8	75.69	10.48	7.85	14.95
	和田	新疆	37.13	79.93	1 375.0	39.28	12.78	7.42	16.11
	若羌	新疆	39.03	88.17	887.7	30.66	11.80	8.06	16.44
Ⅲ区	格尔木	青海	36.42	94.90	2 807.6	42.99	5.26	8.34	18.69
	玉树	青海	33.02	97.02	3 681.2	486.23	3.40	6.76	16.36
	西宁	青海	36.72	101.75	2 295.2	387.26	5.96	6.95	15.48
Ⅳ区	东胜	内蒙古	39.83	109.98	1 461.9	384.87	6.30	8.43	16.09
	延安	陕西	36.60	109.50	958.50	538.43	10.01	7.10	13.78

2　研究方法

2.1　Ångström－Prescott(A－P)模型

基于 n 的 R_s 估算模型是由 Ångström 首先提出，并由 Prescott 改进而形成的经验模型，被称为 Ångström－Prescott(A－P)模型。其表达式为[5-6]

$$R_s = \left(a + b\frac{n}{N}\right)R_a \tag{1}$$

其中

$$R_a = \frac{24\times 60}{\pi}G_{sc}d_r(\omega_s\sin\varphi\sin\delta + \omega_s\cos\varphi\cos\delta) \tag{2}$$

$$d_r = 1 + 0.333\cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \tag{3}$$

$$\delta = 0.409\sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \tag{4}$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi\tan\delta) \tag{5}$$

$$N = \frac{24}{\pi}\omega_s \tag{6}$$

式中　G_{sc}——太阳常数，取 0.082 MJ/(m^2·min)

d_r——日地相对距离

J——日序数

ω_s——太阳高度角，rad

φ——纬度，rad

δ——赤纬，rad

a、b——介于 0～1 之间的经验系数，二者之和为晴空条件下辐射传输率

A－P 模型的参数校正通常使用最小二乘法，建立 R_s/R_a 与 n/N 的关系。利用西北地区 16 个辐射站点 1995—2015 年实测 R_s 与 n 率定参数 a、b，使用 4 种校正方法，将长系列以日为单位的 R_s/R_a 与 n/N 多年相同月份(1—12 月)进行最小二乘回归，共率定 12 次，记为 M1；将长系列以日为单位的 R_s/R_a 与 n/N 分季节(春季 3—5 月，夏季 6—8 月，秋季 9—11 月，冬季 12—2 月)进行最小二乘回归，共率定 4 次，记为 M2；将长系列以日为单位的 R_s/R_a 与 n/N 分半年(夏半年 4—9 月和冬半年 9—3 月)进行最小二乘回归，共率定 2 次，记为 M3；将长系列以日为单位的 R_s/R_a 与 n/N 进行最小二乘回归，产生一组参数，记为 M4。选择适合西北地区不同区域的校正方法，将率定后的参数 a、b 代入 A－P 模型，利用 1961—2015 年实测 n 估算 R_s，构建完整的 R_s 时间序列。

2.2　统计分析

使用辐射模型常用 4 个评价指标：平均偏差 M_{BE}(MBE)、均方根误差 R_{MSE}(RMSE)、归一化均方根误差 n_{RMSE}(nRMSE)和 t 统计量，其计算式为

$$M_{BE} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(S_i - O_i) \tag{7}$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(S_i - O_i)^2} \tag{8}$$

$$n_{RMSE} = \frac{R_{MSE}}{\overline{O}}\times 100\% \tag{9}$$

$$t = \sqrt{\frac{(m-1)M_{BE}^2}{R_{MSE}^2 - M_{BE}^2}} \tag{10}$$

式中　S_i——模拟值　　O_i——实测值

$\overline{O}$——实测平均值

MBE、RMSE 和 nRMSE 越小，说明模拟效果越好。其中，nRMSE 小于等于 10%，认为模拟效果较好；nRMSE 为(10%，20%]，认为模拟效果良好；nRMSE 为(20%，30%]，认为模拟效果合理；nRMSE 为(30%，40%]，认为模拟效果一般；nRMSE 大于 40%，认为模拟效果较差[6]。

2.3　云模型

2.3.1　云模型的数字特征

云模型的数字特征用期望 E_x、熵 E_n 和超熵 H_e 3 个数值来表征[19-21]。

期望 E_x 是云滴在论域空间分布的期望。熵 E_n 是定性概念随机性的度量，既反映了云滴的离散程度和不均匀程度，又反映了云滴的取值范围，对于论域的定性概念有贡献的云滴，主要落在区间$[E_x - 3E_n, E_x + 3E_n]$。超熵 H_e 是熵的不确定性度量，即熵的熵，由熵的随机性和模糊性共同决定，反映了不确定的凝聚性，超熵 H_e 越大，隶属度的随机性越大，云的“厚度”也越大，越不稳定。云模型的 3 个数字特征值把模糊性和随机性完全集成到一起，构成定性和定量相互之间的映射，为定性与定量相结合提供了有利手段。

2.3.2　正向云发生器

正向云发生器是从定性到定量的映射，其算法的主要过程为输入 3 个特征值，即 E_x、E_n 和 H_e，以及云滴数 M；输出 M 个云滴 x_i 及其确定度 u_i($i = 1, 2, \cdots, k$)。具体计算步骤如下：

(1)生成以 E_n 为期望值、H_e^2 为方差的一个正态随机数

$$E'_{ni} = \mathrm{NORM}(E_n, H_e^2) \tag{11}$$

(2)生成以 E_x 为期望值、E'^2_{ni} 为方差的一个正态随机数

$$x_i = \mathrm{NORM}(E_x, E'^2_{ni}) \tag{12}$$

(3)计算确定度

$$u_i = \mathrm{e}^{-(x_i - E_x)^2/[2(E'_{ni})^2]} \tag{13}$$

(4)生成具有确定度 u_i 的 x_i 成为数域中的一个云滴。

(5)重复步骤(1)~(4)k次,产生要求的k个云滴为止。

2.3.3 逆向云发生器

应用云模型理论分析西北地区R_s在时空分布上的不均匀性,根据云模型的数学特征,分别利用云滴$X_i(R_s)$在16个站点55 a的定量数值来还原出云的3个特征参数。

逆向云发生器是实现从定量值到定性概念的转换模型,其算法的过程主要为:输入样本点$X_i(i=1,2,\cdots,k)$;输出数字特征(E_x,E_n,H_e)。E_x、E_n和H_e计算式分别为

$$E_x=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}X_i \tag{14}$$

$$E_n=\sqrt{\frac{\pi}{2}}\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}|X_i-E_x| \tag{15}$$

$$H_e=\sqrt{S^2-E_n^2} \tag{16}$$

其中

$$S^2=\frac{1}{k-1}\sum_{i=1}^{k}(X_i-\overline{X})^2 \tag{17}$$

$$\overline{X}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}X_i \tag{18}$$

式中 k——样本容量 $\overline{X}$——样本均值

S^2——样本方差

3 结果与分析

3.1 A-P模型不同率定方法参数比较

利用西北地区16个辐射站点1995—2015年实测R_s与n,使用A-P模型4种校正方法(M1:分月率定,M2:分季率定,M3:分半年率定,M4:多年率定)率定A-P模型参数a、b。为明确分时段率定A-P模型参数a、b的变化情况,本文以M1为例,所得西北地区各站点A-P模型参数a、b变化情况如表2所示。由表2可以看出:各个站点用M1率定的参数a、b变化显著。其中,乌鲁木齐站分月率定的参数a、b和$a+b$变幅最大,其a值介于0.10~0.29,变异系数为38%,b值介于0.40~0.66,变异系数为14%,$a+b$值介于0.66~0.80,变异系数为5%;和田站分月率定的参数a、b和$a+b$值变幅最小,其a值介于0.24~0.27,变异系数为4%,b值介于0.46~0.51,变异系数为4%,$a+b$值介于0.71~0.75,变异系数为1%。不同站点参数a、b各月平均值变化也十分显著。其中,乌拉特中旗站参数a的平均值(0.26)最大,伊宁站和延安站参数a平均值(0.13)最小;伊宁站参数b平均值(0.62)最大,阿克苏站参数b平均值(0.48)最小。总的来说,西北地区分月率定的A-P模型参数a值介于0.09~0.39,b值介于0.40~0.66,$a+b$值介于0.63~0.85,变化幅度$a>b>(a+b)$。

3.2 A-P模型不同率定方法对R_s的影响

为评价4种校正方法在西北地区的R_s模拟精度,将日尺度上的R_s模拟值和实测值进行线性拟合,结果如表3所示。由表3可以看出:R_s模拟值与实测值拟合结果较好,均呈极显著相关($P<0.01$),Ⅰ区拟合效果最优。其中,Ⅰ区4种校正方法的决定系数(R^2)介于0.974~0.978,变异系数为0.17%,Ⅱ区4种校正方法的R^2范围为0.960~0.961,变异系数为0.05%,Ⅲ区4种校正方法的R^2

表2 M1校正方法下西北地区A-P模型参数

Tab.2 A-P model parameters calibrated by M1 in Northwest China

站点	a			b			$a+b$		
	最大值	最小值	平均值±均方差	最大值	最小值	平均值±均方差	最大值	最小值	平均值±均方差
伊宁	0.16	0.09	0.13±0.02	0.64	0.59	0.62±0.01	0.78	0.72	0.75±0.02
阿勒泰	0.29	0.13	0.18±0.06	0.65	0.54	0.61±0.04	0.84	0.74	0.78±0.03
乌鲁木齐	0.29	0.10	0.16±0.06	0.66	0.40	0.58±0.08	0.80	0.66	0.74±0.04
敦煌	0.26	0.14	0.20±0.04	0.63	0.48	0.56±0.04	0.77	0.74	0.76±0.01
酒泉	0.26	0.17	0.21±0.03	0.59	0.45	0.54±0.05	0.77	0.71	0.75±0.02
银川	0.31	0.16	0.22±0.06	0.61	0.40	0.53±0.07	0.78	0.71	0.75±0.02
乌拉特中旗	0.39	0.16	0.26±0.08	0.63	0.43	0.55±0.03	0.85	0.77	0.81±0.03
喀什	0.25	0.17	0.20±0.02	0.56	0.42	0.50±0.05	0.74	0.63	0.69±0.03
阿克苏	0.25	0.18	0.21±0.03	0.55	0.40	0.48±0.05	0.74	0.64	0.70±0.03
和田	0.27	0.24	0.25±0.01	0.51	0.46	0.49±0.02	0.75	0.71	0.74±0.01
若羌	0.28	0.17	0.23±0.03	0.59	0.45	0.51±0.04	0.76	0.71	0.74±0.01
格尔木	0.28	0.20	0.25±0.02	0.61	0.50	0.55±0.03	0.82	0.77	0.81±0.01
玉树	0.26	0.18	0.23±0.03	0.64	0.50	0.57±0.05	0.84	0.76	0.79±0.03
西宁	0.31	0.19	0.23±0.04	0.60	0.42	0.53±0.06	0.79	0.73	0.76±0.02
东胜	0.24	0.13	0.17±0.04	0.64	0.47	0.57±0.05	0.77	0.70	0.74±0.02
延安	0.15	0.12	0.13±0.01	0.61	0.53	0.57±0.03	0.73	0.67	0.70±0.02

范围为 0.944 ~ 0.946，变异系数为 0.09%，Ⅳ区 4 种校正方法的 R^2 范围为 0.941 ~ 0.942，变异系数为 0.05%，由变异系数可以看出 4 种校正方法在各个分区的 R^2 无明显差异。

表 3　西北地区各分区不同校正方法 R_s 模拟值与实测值之间的决定系数

Tab. 3　Determination coefficients between estimated R_s by different calibrated methods and measured R_s in different aeras of Northwest China

校正方法	Ⅰ区	Ⅱ区	Ⅲ区	Ⅳ区
M1	0.978 **	0.961 **	0.946 **	0.942 **
M2	0.977 **	0.961 **	0.945 **	0.941 **
M3	0.977 **	0.960 **	0.945 **	0.941 **
M4	0.974 **	0.961 **	0.944 **	0.941 **

注：** 表示极显著相关（$P < 0.01$）。

通过将多年平均月尺度上各方法在西北地区的 R_s 模拟值与实测值进行比较，计算各方法月尺度 R_s 模拟值与实测值的平均相对误差，结果如表 4 所示。由表 4 可以看出：各方法月尺度 R_s 模拟值与实测值的平均相对误差由小到大基本表现为 M1、M2、M3、M4，相对误差均在较小范围内，4 种校正方法拟合精度均较高。

表 4　西北地区各分区不同校正方法月尺度 R_s 模拟值与实测值的平均相对误差

Tab. 4　Average relative error between estimated R_s at monthly scale by different calibrated methods and measured R_s in different aeras of Northwest China

%

校正方法	Ⅰ区	Ⅱ区	Ⅲ区	Ⅳ区
M1	0.115	0.336	0.422	0.353
M2	1.044	1.230	0.749	0.743
M3	1.678	1.300	0.881	1.519
M4	2.406	1.396	0.954	1.496

4 种校正方法计算 R_s 日值的统计分析箱线图如图 2 所示。图 2 显示Ⅰ区 4 种校正方法的 MBE 中位数均为 0，离散程度由小到大为 M1、M2、M3、M4，且 RMSE、nRMSE 分布相似，除 M4 外，其余 3 种方法的 t 检验值（排除异常值）均小于 1.65（$P < 0.05$）（注：若 t 检验值小于 1.65（$P < 0.05$），说明该方法率定下 R_s 模拟值和实测值无明显差异）。Ⅱ区 M1、M2 和 M3 的 MBE 中位数均为 0，M4 的 MBE 值均小于 0，4 种校正方法 RMSE、nRMSE 分布相似，M1、M3 的 t 检验值均小于 1.65（$P < 0.05$），M2、M4 的 t 检验值部分大于 1.65。Ⅲ区 M1、M2 的 MBE 中位数均为 0，且分布集中，M3 的 MBE 均小于 0，M4 的 MBE 中位数大于 0，分布较离散，4 种校正方法 RMSE、nRMSE 分布相似，M1、M2、M3 的 t 检验值均小于 1.65（$P < 0.05$），M4 的 t 检验值部分大于 1.65，且离散程度较高。Ⅳ区 M1、M2 的 MBE 中位数均为 0，且分布集中，M3、M4 的 MBE 均小于 0，4 种校正方法 RMSE、nRMSE 分布相似，M1、M2 的 t 检验值均小于 1.65（$P < 0.05$），M3、M4 的 t 检验值部分大于 1.65，且离散程度较高。

综上所述，日尺度和月尺度上 4 种方法 R_s 模拟值与实测值拟合结果均较好。各分区 4 种校正方法计算 R_s 的 RMSE、nRMSE 分布相似，MBE 略有差异，t 检验结果表明Ⅰ区和Ⅲ区使用 M1、M2、M3 计算的 R_s 值与实测值无明显差异，即可认为 M1、M2、M3 在Ⅰ区和Ⅲ区的预测精度等效；Ⅱ区使用 M1、M3 计算的 R_s 值与实测值无明显差异，即可认为 M1、M3 在Ⅱ区的预测精度等效；Ⅳ区使用 M1、M2 计算的 R_s 值与实测值无明显差异，即可认为 M1、M2 在Ⅳ区的预测精度等效。选取其中精度高且简便的方法，即Ⅰ区、Ⅱ区和Ⅲ区各站点用 M3 率定 A－P 模型参数 a、b，Ⅳ区各站点用 M2 率定 A－P 模型参数 a、b，各

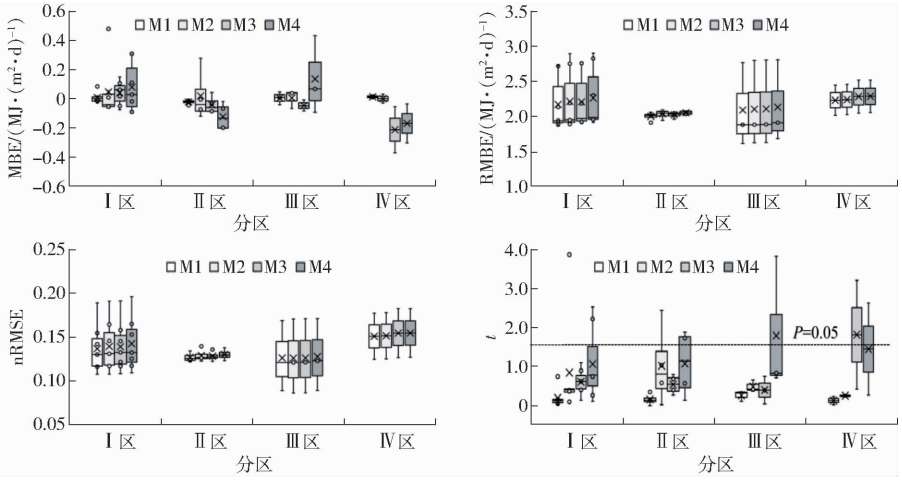


图 2　4 种校正方法计算 R_s 日值的统计分析箱线图

Fig. 2　Statistical analysis box charts of four calibrated methods

站点具体使用的 A－P 模型参数见表 5、6。

表 5 Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区各辐射站点具体使用的 A－P 模型参数

Tab.5 A－P model parameters of radiation sites from Ⅰ area, Ⅱ area and Ⅲ area

分区	站点	a		b	
		夏半年	冬半年	夏半年	冬半年
Ⅰ区	伊宁	0.12	0.14	0.62	0.61
	阿勒泰	0.14	0.22	0.63	0.59
	乌鲁木齐	0.12	0.22	0.64	0.52
	敦煌	0.18	0.23	0.57	0.53
	酒泉	0.20	0.23	0.56	0.51
	银川	0.17	0.26	0.58	0.48
	乌拉特中旗	0.21	0.31	0.58	0.52
Ⅱ区	喀什	0.19	0.21	0.52	0.46
	阿克苏	0.20	0.23	0.52	0.45
	和田	0.25	0.25	0.49	0.48
	若羌	0.22	0.26	0.53	0.48
Ⅲ区	格尔木	0.26	0.25	0.55	0.54
	玉树	0.23	0.22	0.55	0.58
	西宁	0.19	0.25	0.58	0.50

表 6 Ⅳ区各辐射站点具体使用的 A－P 模型参数

Tab.6 A－P model parameters of radiation sites from Ⅳ area

分区	站点	a				b			
		春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
Ⅳ区	东胜	0.15	0.16	0.15	0.23	0.61	0.58	0.59	0.51
	延安	0.12	0.14	0.13	0.14	0.60	0.57	0.56	0.54

3.3 R_s时间分布特性的云模型分析

Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区各站点用 M3 率定 A－P 模型参数 a、b，Ⅳ区各站点用 M2 率定 A－P 模型参数 a、b，将率定后的参数 a、b 代入 A－P 模型，利用 1961—2015 年实测 n 估算 R_s，构建完整的西北地区 R_s时间序列。平均西北地区 4 个分区各站点春、夏、秋、冬及多年平均日 R_s，得到各区域不同时间尺度的 R_s值。以西北地区 4 个分区的 1961—2015 年共 55 a 的 R_s作为研究对象，根据逆向云发生器的算法计算各自云模型的数字特征（表 7），然后根据正向云发生器的算法计算云滴并分别绘制西北地区不同时间尺度的隶属云图（图 3）。云模型中期望 E_x是 R_s的平均值，反映了该区 1961—2015 年春、夏、秋、冬及多年的平均日 R_s值。熵 E_n体现了 R_s相对于平均值的确定度，也反映 R_s相对于平均值的离散度，其值越大，R_s在 55 a 分布越不均匀。超熵 H_e反映了熵的离散程度，其值反映不均匀性的稳定性。

由表 7 中的 4 个分区云模型的数字特征可以看出，春季 R_s值由小到大为Ⅱ区、Ⅳ区、Ⅰ区、Ⅲ区，夏季 R_s值由小到大为Ⅳ区、Ⅲ区、Ⅱ区、Ⅰ区，秋季 R_s值由小到大为Ⅳ区、Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区，冬季 R_s值由小到大为Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅳ区、Ⅲ区。春、夏、秋、冬均表现为Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区 R_s时间分布的不均匀性较小且较稳定，Ⅳ区 R_s时间分布的不均匀性较大且不稳定。年尺度上，R_s强度由小到大为Ⅳ区、Ⅱ区、Ⅰ区、Ⅲ区，Ⅰ区 R_s时间分布的不均匀性较小但不稳定，Ⅱ区、Ⅲ区 R_s时间分布的不均匀性较小且较稳定，Ⅳ区 R_s时间分布的不均匀性较大且不稳定。整个西北地区春、夏、秋、冬及年尺度上 R_s平均值分别为 18.799、21.515、13.376、9.540、15.808 MJ/(m^2·d)。其中，春、夏、秋和年尺度均表现为 R_s在时间分布上的不均匀性较小且较稳定，冬季 R_s在时间分布上的不均匀性较小但不稳定。这些特征也可由数字特征值经逆向云发生器算法得到的隶属云图（图 3）中直观看出。

表 7 西北地区及各个分区不同时间尺度 R_s时间分布云模型的数字特征

Tab.7 Cloud model digital characteristics of time distribution of each area at different time scales of R_s in Northwest China MJ/(m^2·d)

分区	时段	E_x	E_n	H_e
Ⅰ区	春	19.160	0.646	0.090
	夏	22.624	0.537	0.168
	秋	13.134	0.329	0.015
	冬	8.620	0.327	0.122
	全年	15.886	0.288	0.116
Ⅱ区	春	17.834	0.677	0.139
	夏	22.041	0.583	0.121
	秋	13.684	0.355	0.020
	冬	8.712	0.433	0.068
	全年	15.569	0.300	0.056
Ⅲ区	春	20.170	0.425	0.138
	夏	21.723	0.688	0.075
	秋	14.772	0.422	0.121
	冬	11.418	0.282	0.088
	全年	17.020	0.287	0.043
Ⅳ区	春	18.032	1.239	0.190
	夏	19.673	1.076	0.236
	秋	11.912	0.731	0.226
	冬	9.412	0.448	0.143
	全年	14.757	0.553	0.082
西北地区	春	18.799	0.597	0.035
	夏	21.515	0.457	0.015
	秋	13.376	0.333	0.012
	冬	9.540	0.300	0.107
	全年	15.808	0.236	0.016

3.4 R_s空间分布特性的云模型分析

根据 16 个代表气象站点在 55 a 春、夏、秋、冬及年尺度的多年平均 R_s，分析 R_s在空间上的变化特性，西北地区 R_s的空间分布如图 4 所示。

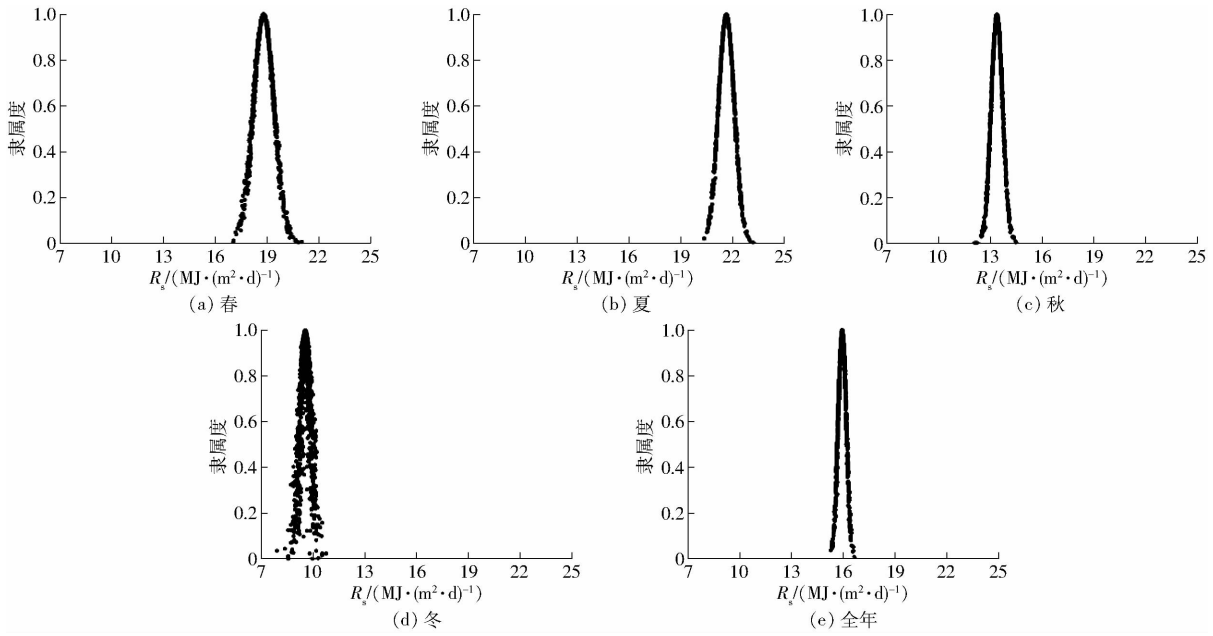


图 3　西北地区不同尺度 R_s 时间分布隶属云图

Fig. 3　Time distribution clouds of R_s at different scales in Northwest China

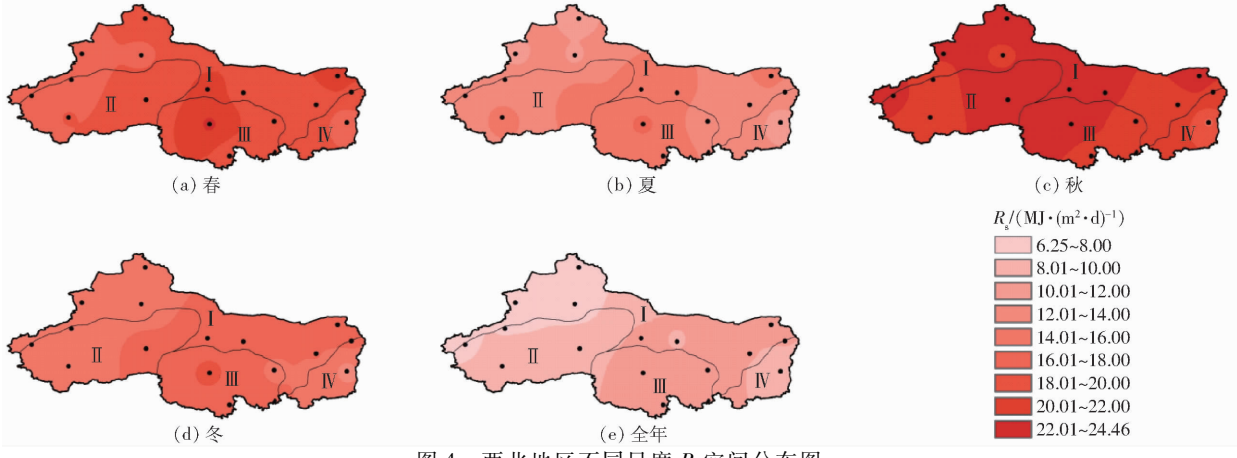


图 4　西北地区不同尺度 R_s 空间分布图

Fig. 4　Space distributions of R_s at different scales in Northwest China

由图 4 可以看出，西北地区 R_s 空间分布不均匀且具有季节性差异。夏季 R_s 值最大，其次是春季，秋季和冬季 R_s 值较小。4 个季节均表现为Ⅲ区（青海省）R_s 值较大，这与青海省特殊的地形地貌和气候区域条件有关。青海省位于青藏高原东北部，是“世界屋脊”青藏高原的一部分，海拔 1 650 ~ 6 860 m，光能资源极其丰富[26]，故其常年日照辐射强烈。同时通过计算 1961—2016 年春、夏、秋、冬及年尺度 R_s 在空间分布上的云模型数字特征可知，春、夏、秋、冬及年尺度空间分布上的熵 E_n 分别为 1.628、1.456、1.634、1.809、1.352 MJ/(m²·d)，远大于时间尺度上的 0.597、0.457、0.333、0.300、0.236 MJ/(m²·d)，这说明各站点的多年 R_s 相对于其多年平均值较为离散，同时春、夏、秋、冬及年尺度空间分布上的超熵 H_e 分别为 0.423、0.688、0.300、0.475、0.326 MJ/(m²·d)，远大于时间分布上的 0.035、0.015、0.012、0.107、0.016 MJ/(m²·d)。因此，与 R_s 在时间上的分布特性相比，其在空间上的分布特性更不均匀、且不均匀性更不稳定。其中，夏季 R_s 空间分布的不均匀性最不稳定。这也可以通过图 5 和图 3 的比较直观得出。

4　结论

（1）各站点分月率定的参数 a、b 变化显著；日尺度上 4 种方法 R_s 模拟值与实测值线性拟合结果均较好；多年平均月尺度上各方法计算 R_s 的相对误差由小到大基本表现为 M1、M2、M3、M4，相对误差均在较小范围内。

（2）各分区 4 种校正方法计算 R_s 的 RMSE、nRMSE 分布相似，MBE 略有差异，t 检验结果表明

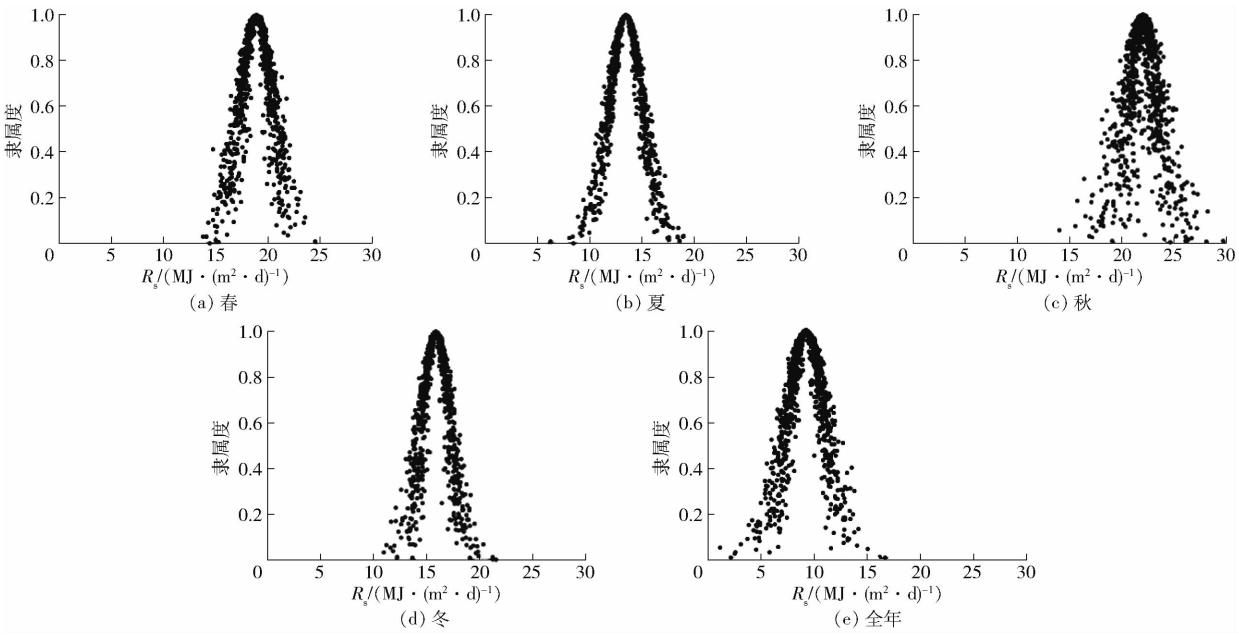


图 5 西北地区不同尺度 R_s 空间分布隶属云图

Fig. 5 Space distribution clouds of R_s at different scales in Northwest China

Ⅰ区使用 M1、M2、M3 计算的 R_s 值与实测值无明显差异，Ⅱ区使用 M1、M3 计算的 R_s 值与实测值无明显差异，Ⅲ区使用 M1、M2、M3 计算的 R_s 值与实测值无明显差异，Ⅳ区使用 M1、M2 计算的 R_s 值与实测值无明显差异。

(3) Ⅰ区 R_s 时间分布的不均匀性较小但不稳定，Ⅱ区、Ⅲ区 R_s 时间分布的不均匀性较小且较稳定，Ⅳ区 R_s 时间分布的不均匀性较大且不稳定。整个西北地区春、夏、秋和年尺度均表现为 R_s 在时间分布上的不均匀性较小且较稳定，冬季 R_s 在时间分布上的不均匀性较小但不稳定。

(4) 西北地区 R_s 空间分布不均匀，4 个季节均表现为Ⅲ区(青海省) R_s 较强；与 R_s 在时间上的分布特性相比，其在空间上的分布特性更不均匀、不稳定。

参 考 文 献

1 FENG Y, CUI N, ZHANG Q, et al. Comparison of artificial intelligence and empirical models for estimation of daily diffuse solar radiation in North China Plain[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(21):14418 - 14428.

2 任鸿瑞，罗毅，谢贤群. 几种常用净辐射计算方法在黄淮海平原应用的评价[J]. 农业工程学报，2006，22(5)：140 - 146.
REN Hongrui, LUO Yi, XIE Xianqun. Evaluation of application of several net radiation calculation methods in Huanghuaihai Plain [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 140 - 146. (in Chinese)

3 郑祚芳，张秀丽. 北京地区地面太阳辐射长期演变特征[J]. 太阳能学报，2013，34(10)：1829 - 1834.
ZHENG Zuofang, ZHANG Xiuli. Long-term variation features of global solar radition in Beijing[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013, 34(10): 1829 - 1834. (in Chinese)

4 武伟，范莉，李茂芬，等. 不同时间尺度太阳辐射数据对作物生长模型的影响[J]. 农业工程学报，2012，28(3)：123 - 128.
WU Wei, FAN Li, LI Maofen, et al. Sensitivity analysis of crop growth models to multi-temporal scale solar radiation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 123 - 128. (in Chinese)

5 LIU X Y, MEI X R, LI Y Z, et al. Variation in reference crop evapotranspiration caused by the Ångström - Prescott coefficient: locally calibrated versus the FAO recommended[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(7):1137 - 1145.

6 吴立峰，刘惠英，张富仓. 辐射模型不同率定方法总辐射数据缺失插补比较[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(10)：172 - 180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20161023&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.023.
WU Lifeng, LIU Huiying, ZHANG Fucang. Comparison of different calibration methods on Ångström - Prescott model for missing data interpolation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 172 - 180. (in Chinese)

7 向友珍，吴立峰，张富仓，等. 基于常规气象资料估算南方地区日辐射总量方法比较[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(10)：181 - 192. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20161024&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.024.
XIANG Youzhen, WU Lifeng, ZHANG Fucang, et al. Comparison of total radiation estimation methods in south area based on

conventional meteorological data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 181 - 192. (in Chinese)

8 段春锋,缪启龙,曹雯. 西北地区参考作物蒸散变化特征及其主要影响因素[J]. 农业工程学报,2011,27(8):77 - 83.
DUAN Chunfeng, MIAO Qilong, CAO Wen. Changing characteristics of reference crop evapotranspiration and main causes in the Northwest China[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 77 - 83. (in Chinese)

9 王卫东. 基于神经网络的西北地区太阳辐射模拟及时空特征分析[D]. 兰州:西北师范大学,2014.
WANG Weidong. Simulation of solar radiation and study on temporal-spatial changes in Northwest China based on neural network. [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2014. (in Chinese)

10 HAKUBA M Z, FOLINI D G, SCHAEPMAN-STRUB G, et al. Solar absorption over Europe from collocated surface and satellite observations[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 119(6):3420 - 3437.

11 VERDIN A, RAJAGOPALAN B, KLEIBER W, et al. Coupled stochastic weather generation using spatial and generalized linear models[J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2015, 29(2):347 - 356.

12 URRACA R, ANTONANZAS J, ALIA-MARTINEZ M, et al. Smart baseline models for solar irradiation forecasting[J]. Energy Conversion & Management, 2016, 108:539 - 548.

13 SOLER A. Statistical comparison for 77 European stations of 7 sunshine-based models[J]. Solar Energy, 1990, 45(6):365 - 370.

14 PODESTA G P, NUNEZ L, VILLANUEVA C A, et al. Estimating daily solar radiation in the Argentine Pampas[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2004, 123(1 - 2):41 - 53.

15 HUSSAIN M, RAHMAN L, RAHMAN M M. Technical note : techniques to obtain improved predictions of global radiation from sunshine duration[J]. Renewable Energy, 1999, 18(2):263 - 275.

16 LI M F, FAN L, LIU H B, et al. Impact of time interval on the Ångström - Prescott coefficients and their interchangeability in estimating radiation[J]. Renewable Energy, 2012, 44:431 - 438.

17 LIU X, MEI X, LI Y, et al. Choice of the Ångström - Prescott coefficients: are time-dependent ones better than fixed ones in modeling global solar irradiance? [J]. Energy Conversion & Management, 2010, 51(12):2565 - 2574.

18 李德毅,孟海军. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995(6):15 - 20.
LI Deyi, MENG Haijun. Member clouds and membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995(6):15 - 20. (in Chinese)

19 刘德地,陈晓宏,楼章华. 基于云模型的降雨时空分布特性分析[J]. 水利学报,2009,40(7):850 - 857.
LIU Dedi, CHEN Xiaohong, LOU Zhanghua. Analysis on characteristics of spatial-temporal precipitation distribution based on cloud model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7):850 - 857. (in Chinese)

20 赵璐,崔宁博,梁川,等. 基于云模型的四川省潜在蒸散量时空分布研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2013,45(1):91 - 97.
ZHAO Lu, CUI Ningbo, LIANG Chuan, et al. Analysis on characteristics of temporal-spatial potential evapotranspiration distribution in Sichuan based on cloud model[J]. Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition, 2013, 45(1):91 - 97. (in Chinese)

21 龙贻东,梁川,景楠,等. 基于云模型和相对湿润度指数的干旱时空分布特征分析[J]. 灌溉排水学报,2015,34(8):67 - 71.
LONG Yidong, LIANG Chuan, JING Nan, et al. Analysis on characteristics of temporal-spatial drought distribution based on cloud model and relative moisture index[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(8):67 - 71. (in Chinese)

22 曹雯,申双和,段春锋. 西北地区生长季参考作物蒸散变化成因的定量分析[J]. 地理学报,2011, 66(3):407 - 415.
CAO Wen, SHEN Shuanghe, DUAN Chunfeng. Quantification of the causes for reference crop eapotranspiration changes in growing season in Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 407 - 415. (in Chinese)

23 刘志有,蒲春玲,刘明. 基于系统聚类分析法的土地利用分区的研究:以新疆伊犁州直为例[J]. 科技和产业,2012, 12(11):47 - 49.
LIU Zhiyou, PU Chunlin, LIU Ming. Application analysis of post evaluation theory on competitiveness of thermal power projects [J]. Science Technology and Industry, 2012, 12(11):47 - 49. (in Chinese)

24 吕敬堂,吕大明,张浩. 基于 SPSS 的农业功能聚类分区方法[J]. 中国农业资源与区划,2010,31(1):68 - 74.
LÜ Jingtang, LÜ Daming, ZHANG Hao. Acluster district method for agricultural function based on SPSS[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2010, 31(1):68 - 74. (in Chinese)

25 周丽,范志华,刘术良,等. 内江市近 40 年气温和降水变化趋势分析[J]. 安徽农业大学学报,2012,39(1):107 - 110.
ZHOU Li, FAN Zhihua, LIU Shuliang, et al. Change trend of temperature and precipitation in Neijiang in recent 40 years[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2012, 39(1):107 - 110. (in Chinese)

26 周秉荣,李凤霞,颜亮东,等. 青海省太阳总辐射估算模型研究[J]. 中国农业气象,2011,32(4):495 - 499.
ZHOU Bingrong, LI Fengxia, YAN Liangdong, et al. Research on model of solar radiation estimation in Qinghai Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(4):495 - 499. (in Chinese)