排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2018 年 5 月 May 2018 | 第 36 卷 第 5 期 Vol. 36 No. 5
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.17.0216

淮北平原 Angstrom 公式参数校正及太阳总辐射时空特征分析


袁宏伟

袁宏伟[1,2]，袁先江[1,2]，汤广民[1,2]，崔毅[3]，蒋尚明[1,2*]
（1. 安徽省水利科学研究院，安徽 蚌埠 233000；2. 水利水资源安徽省重点实验室，安徽 蚌埠 233000；3. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室，天津 300072）

摘要：为了解淮北平原太阳总辐射的时空特征，基于安徽省新马桥试验站内自动气象站 2011—2016 年的实测太阳总辐射 R_s 数据，分别采用最小二乘法和遗传算法对 Angstrom 公式中经验系数 a，b 值进行率定，对比分析 2 种率定值与 FAO 建议值计算 ET_0 和 R_s 的差别；基于优选的率定参数，选取砀山、亳州、宿县、蚌埠及阜阳 5 个典型气象站点，对淮北平原太阳总辐射的时空分布特性进行分析. 结果表明，FAO 建议的经典参数 a，b 值并不适用于淮北平原，其较大估计了 R_s 和 ET_0. 通过最小二乘法和遗传算法率定得出的 a，b 值均可有效提高 R_s 和 ET_0 两者计算的准确性，且遗传算法率定的结果更优. 1955—2014 年的 60 a 内，淮北平原的日均 R_s 从北到南总体呈现逐渐降低的趋势，且平原北部下降幅度明显低于平原南部，1980 年为主要转折年，1980 年之前安徽省淮北平原年日均 R_s 年际下降趋势不明显，1980 年之后年日均 $R_{s年际}$ 下降趋势明显；R_s 季节分布特征依次为夏季、春季、秋季、冬季，全年和各季度平均 R_s 在空间上呈现总体北高南低、局部有所差别的分布特征；此外，月尺度上 R_s 年内变化趋势呈现为单峰型分布，最大峰值出现在 6 月份，12 月份最低. 文中的研究成果可为淮北平原常规气象数据精确计算 R_s 和 ET_0 提供参考.

关键词：太阳总辐射；Angstrom 公式；参考作物蒸发蒸腾量；淮北平原；遗传算法；分布特征
中图分类号：S214　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2018)05-0426-07

袁宏伟，袁先江，汤广民，等. 淮北平原 Angstrom 公式参数校正及太阳总辐射时空特征分析[J]. 排灌机械工程学报，2018，36(5)：426-432.

YUAN Hongwei，YUAN Xianjiang，TANG Guangmin，et al. Correction of parameters in Angstrom formula and analysis of total solar radiation characteristics in Huaibei plain[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2018，36(5)：426-432.(in Chinese)

Correction of parameters in Angstrom formula and analysis of total solar radiation characteristics in Huaibei plain

YUAN Hongwei[1,2]，*YUAN Xianjiang*[1,2]，*TANG Guangmin*[1,2]，*CUI Yi*[3]，*JIANG Shangming*[1,2*]
(1. Water Resources Research Institute of Anhui Province，Bengbu，Anhui 233000，China；2. Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province，Bengbu，Anhui 233000，China；2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety，Tianjin University，Tianjin 300072，China)

Abstract：Based on the total solar radiation data observed by automatic meteorological equipment in the Xinmaqiao Experimental Station，Anhui province，during 2011—2016，the empirical coefficients a and b in the Angstrom formula were calibrated by least squares method and genetic algorithm. Addi-

收稿日期：2017-09-22；**修回日期**：2017-12-04；**网络出版时间**：2018-04-25
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180425.1418.012.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51409002，71273081)；国家重点研发计划项目(2017YFD0301301)
第一作者简介：袁宏伟(1984—)，男，山东青州人，工程师(yuanhw_1984@163.com)，主要从事农田灌溉排水研究.
通信作者简介：蒋尚明(1983—)，男，广西桂林人，工程师(jiangshangming@163.com)，主要从事农村水利系统工程研究.

tionally, ET_0 and total solar radiation calculated by the calibrated values were compared with the recommended values by FAO. Based on the optimized empirical parameters and the data observed in five typical meteorological stations located in Dangshan, Bozhou, Suxian, Bengbu and Fuyang, the temporal and spatial distribution characteristics of the total solar radiation in the Huaibei plain were analyzed. The results show that the recommended values of a and b by FAO are unsuitable to the total solar radiation in the Huaibei plain because of overestimated *Rs* and ET_0. The calibrated values by the least squares method and genetic algorithm can result in more accurate R_s and ET_0. In 1955—2014, the average daily total solar radiation presents a downtrend from north to south in the plain, and the decline is larger in the north than in the south. The year of 1980 is a turning point before that adaily total solar radiation declined tendency is not obvious, but after that the radiation is declined obviously. The seasonal distribution characteristics of R_s from the largest to the smallest are: summer > spring > autumn > winter. The yearly and seasonally average R_s distributions are higher in the north and lower in the south generally, but there is a difference in R_s locally. Besides, the monthly R_s shows a unimodal distribution, its maximum is in June and the minimum is in December. These results can provide a reference for accurately calculating R_s and ET_0 based on conventional meteorological data in the plain.

Key words: total solar radiation; Angstrom equation; reference crop evapotranspiration; Huaibei plain; genetic algorithm; distribution characteristics

太阳总辐射 R_s 是地表最基本最重要的能源之一,其时空分布直接影响并改变着气温、湿度、降水和地表蒸散发等气候要素. 合理确定太阳总辐射是分析地表能量平衡关系[1-2]、评价参考作物蒸发蒸腾量[3-5](ET_0)及地区太阳辐射时空分布特征的重要前提之一[6-9]. 目前,中国太阳辐射观测站数量很少,安徽省气象台站中仅有 2 个具有太阳辐射观测功能(合肥站、屯溪站)[6],单独依靠观测资料精确描述太阳辐射在淮北平原的空间分布十分困难,采用特定站点实测数据率定参数、经典公式推广应用的方法可为分析太阳辐射的空间分布特性提供参考.

Angstrom 公式是计算太阳总辐射 R_s 的主要方法之一[10-14],该公式中 2 个经验参数 a 和 b 的数值直接关系着太阳总辐射 R_s 的计算值是否准确. 已有研究中对于参数 a 和 b 的取值主要通过 2 个途径,一是采用 FAO 建议值 a 和 b,分别取 0.250 和 0.500[10],且该方法被大量应用于作物需水分析[6-9]、气候变化评估等[15-18]相关研究;二是通过实测数据率定得到,率定手段主要采用最小二乘法. 采用 FAO 建议值的取值方法具有一定的地域差异,是否适用于淮北平原地区仍值得商榷;实测数据率定方法具有良好的地域适用性,但由于观测站较少,实测数据难以获取,尤其是淮北平原地区. 利用遗传算法对 a 和 b 进行率定尚未见于其他相关文献.

文中以安徽省(水利部淮委)水利科学研究院新马桥试验站内自有自动气象站 2011—2016 年的实测太阳总辐射 R_s 数据为基础,采用最小二乘法和遗传算法(genetic algorithm, GA)2 种方法对 Angstrom 公式中的经验参数 a 和 b 进行率定[14,19],判别 2 组率定值及 FAO 建议值条件下 ET_0 和 R_s 计算值的准确性,提出最优的经验参数 a 和 b 取值;然后基于优选的 a 和 b 值,通过 Angstrom 公式对淮北平原 5 个站点 60 a(1955—2014 年)的太阳辐射进行计算,分析淮北平原太阳辐射的空间分布特征,研究结果可为淮北平原制定区域发展政策、合理开发利用气候资源、实施生态建设和应对气候变化等提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　典型气象站点选择

淮北平原位于安徽省北部(114°55′ ~ 118°10′ E, 32°25′ ~ 34°35′N),东接江苏,北连山东,南以淮河为界,为黄淮海平原的一部分,地处黄淮海平原南侧,为北亚热带与暖温带的过渡地带. 行政区包括阜阳市、亳州市、宿州市、淮北市全部,淮南市、蚌埠市大部,共 27 个县(市、区),新马桥试验站位于淮北平原南端(117°22′E, 33°09′N),海拔 19.7 m,设有英国 DELTA - T 公司产 WS - STD1 标准型自动气象站,可监测太阳总辐射,其准确度和精度相对较高,精度可达 0.000 001 W/m^2. 此外,为分析淮北平原太阳总辐射的空间分布情况,选取砀山、亳

州、宿县、蚌埠及阜阳5个典型气象站点，这些站点由北到南基本可大致覆盖整个淮北平原，如图1所示，各站点具有1955—2014年60 a的逐日气象观测数据，各站点的经纬度及海拔如表1所示，表中h为海拔.

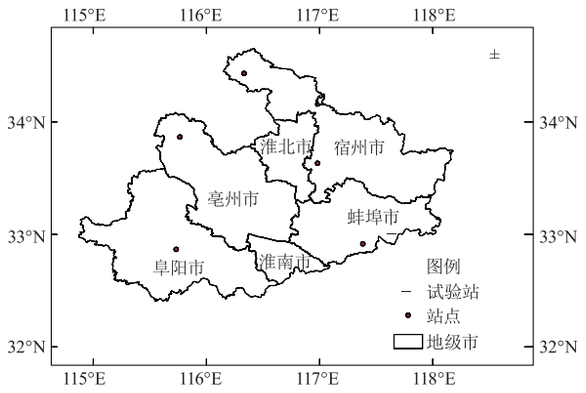


图1 淮北平原典型气象站点分布示意图

Fig. 1 Typical meteorological stations in Huaibei plain

表1 典型气象站点经纬度及海拔

Tab. 1 Latitude, longitude and altitude of typical meteorological stations

站点	纬度	经度	h/m
砀山	34°26′	116°20′	44.2
亳州	33°52′	115°46′	37.7
宿县	33°38′	116°59′	25.9
蚌埠	32°55′	117°23′	21.9
阜阳	32°52′	115°44′	32.7

1.2 Angstrom公式及ET_0计算方法

Angstrom公式最早是由埃斯川姆于1922年提出的，后由左大康等将此公式引入中国[12-13]，其计算公式为

$$R_s = (a + bS)R_a, \tag{1}$$

式中：S为日照百分率，即实际和理论日照时数之比；R_a为大气边缘太阳辐射，MJ/(m^2·d)，大气边缘太阳辐射是指到达大气上界的太阳辐射，其分布和变化不受大气影响，主要受日地距离、太阳高度角和白昼长度的影响，文中采用日天文辐射总量代表；a，b为经验参数，反映外空辐射通过大气层过程中的衰减特征.

ET_0采用Penman-Montieth公式计算，即

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\dfrac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}, \tag{2}$$

式中：R_n为作物表面的净辐射量，MJ/(m^2·d)；G为土壤热通量，MJ/(m^2·d)；T为平均气温，℃；u_2为2 m高处的平均风速，m/s；e_s为饱和水气压，kPa；e_a为实际水气压，kPa；Δ为饱和水压与温度曲线的斜率，kPa/℃；γ为干湿表常数.

作物表面的净辐射量R_n的计算公式为

$$R_n = (1 - \alpha)R_s - R_{nl}, \tag{3}$$

式中：α为参照作物反射率，取0.23；R_{nl}为净长波辐射，MJ/(m^2·d). 式(2)，(3)中其他变量的计算公式可参见《灌溉试验规范 SL 13—2015》.

1.3 参数率定方法

文中参数率定方法选用最小二乘法与遗传算法. 最小二乘法为相关研究中比较通用的系数率定方法，根据大气边缘太阳辐射R_a和实测R_s，S，通过最小二乘回归拟合式(1)，即得到a，b的率定值.

遗传算法由于具有只需优化问题是可计算的，便可在搜索空间中进行自适应全局搜索，且优化过程简单、结果丰富，特别适合于处理复杂函数优化、组合优化等问题，具有适应性强、精度高等特点[14]，因此文中另外选择遗传算法，并对其率定参数的可行性进行分析比较. 以经验系数a，b为优化变量，以新马桥试验站实测R_s/R_a和日照百分率S为目标函数，采用遗传算法进行优化求解，最终得到基本适用于淮北平原的a，b值，具体过程为

$$\min f(a,b) = \sum_{i=1}^{n} | X_i(a,b) - Y_i |, \tag{4}$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} 0 \leqslant a \leqslant 1, \\ 0 \leqslant b \leqslant 1, \end{cases} \tag{5}$$

式中：X_i为第i日日照百分率S；Y_i为第i日实测太阳总辐射与大气边缘太阳辐射比值(R_s/R_a)；n为日太阳总辐射数据个数.

2 结果与分析

2.1 参数率定及优选

基于新马桥试验站内自动气象站2011—2016年的实测逐日太阳总辐射和日照百分数，分别利用最小二乘法和遗传算法率定得到Angstrom公式中的经验参数a，b. 为更好评价上述2组率定参数及FAO推荐参数的适宜性，完成参数优选，采用平均误差、平均绝对误差、均方根误差以及相关系数4个统计指标进行评价[17]. 率定的参数及3组不同经验系数的R_s计算值与实测值的对比分析如表2，表中σ为平均误差，MAE为平均绝对误差，$RMSE$为均方根误差，R_{sc}为计算值，R_{ss}为实测值，R为相关系数.

由表2可以看出，采用FAO推荐的经验系数a，

b 得到的 R_s 计算值的平均误差、平均绝对误差、均方根误差均显著大于基于最小二乘法和遗传算法率定 a,b 参数计算得到的 R_s. 当经验系数 a,b 取 0.253,0.320 时,太阳日总辐射计算值和实测值的相关系数最大且平均误差和平均绝对误差均最小,表明采用遗传算法拟合的经验系数 $a=0.253$,$b=0.320$ 可以比较有效地估算淮北平原的太阳辐射,且优于最小二乘法的率定结果. 另外表 2 中数据也表明利用 FAO 建议值计算淮北平原的太阳辐射,要明显偏高于真实值,平均可高出实测值的 23.38%.

表 2　不同经验系数 a 和 b 下的 R_s 计算值与实测值的对比分析

Tab. 2　Comparison between calculated and observed R_s based on different a and b

系数来源	经验系数	σ	MAE/(MJ·m^{-2}·d^{-1})	$RMSE$/(MJ·m^{-2}·d^{-1})	R_{sc}/R_{ss}	R
FAO 建议值	a=0.250,b=0.500	2.52	5.13	6.68	1.233 8	0.865 8
最小二乘法率定值	a=0.261,b=0.305	0.71	3.52	4.40	1.066 1	0.869 4
遗传算法率定值	a=0.253,b=0.320	0.66	2.29	4.49	1.061 2	0.870 6

Penman－Montieth 公式计算 ET_0 时也会受到经验系数 a,b 的影响,利用新马桥试验站 2011—2016 年的逐日气象数据,分别采用 FAO 建议值的经验系数 $a=0.250$,$b=0.500$ 以及优选的经验系数 $a=0.253$,$b=0.320$ 计算 ET_0. 选取 FAO 建议值时,2011—2016 年内日均 ET_0 为 2.48 mm,选取优选参数时,日均 ET_0 为 2.07 mm. 可以看出,FAO 建议值计算的 ET_0 明显高于优选参数计算的 ET_0,前者可比后者增大 19.8%.

综上可知,FAO 建议的经验参数 a,b 值并不适用于淮北平原太阳总辐射 R_s 和参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 的计算,计算值较实测值偏大,会过大估计参考作物蒸发蒸腾量,不利于节水,而利用遗传算法率定得到的经验系数 a,b 值更适用于淮北地区.

2.2　淮北平原 R_s 的时空分布特征

基于优选的经验参数 a,b,采用各站点 1955—2014 年的逐日气象观测数据计算得到太阳总辐射 R_s,以下将从年、季度和月份 3 个时间尺度分析淮北平原的 R_s 的时空分布特征.

2.2.1　年尺度

图 2 给出了 1955—2014 年淮北平原太阳总辐射日均值 R_{sr}的年际变化趋势,可以看出,总体上,5 个站点 1955—2014 年的 R_s 变化趋势均呈现显著的下降趋势,但下降幅度有所不同,阜阳和蚌埠 2 个站点的 R_s 降幅明显高于砀山、宿县和亳州站点,阜阳站年日均 R_s 平均每年下降幅度为 0.03 MJ/m^2 而砀山站日均 R_s 值的年降幅仅为 0.01 MJ/m^2,这也说明淮北平原南部近 60 a 来 R_s 的年际下降幅度明显高于北部地区. 造成以上规律的原因应主要来源于日照百分率的变化,由表 3 可以看出淮北平原南部的日照百分率明显低于平原北部.

采用累积距平曲线(此为 1955—2014 年 R_s 年日均值与 60 a 内 R_s 年日均值的差值的累积值构成的曲线)对淮北平原不同站点太阳总辐射进行周期分析,如图 3 所示,其中 R_{sa}为 R_s 年日均值累积距平.

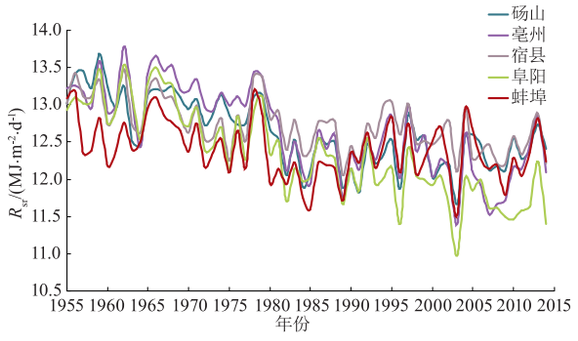


图 2　1955—2014 年淮北平原 R_s 日均值的年际变化趋势

Fig. 2　Yearly variation of total solar radiation in Huaibei plain in 1955—2014

表 3　1955—2014 年典型气象站点日照百分率

Tab. 3　Sunshine percentage of typical meteorological stations in 1955—2014.　%

站点	春季	夏季	秋季	冬季	全年
砀山	53.13	50.83	54.02	50.32	52.07
亳州	52.18	51.59	52.92	49.21	51.47
宿县	51.66	51.06	54.73	51.40	52.21
蚌埠	45.97	48.06	48.31	44.30	46.66
阜阳	46.76	47.76	49.83	45.71	47.51

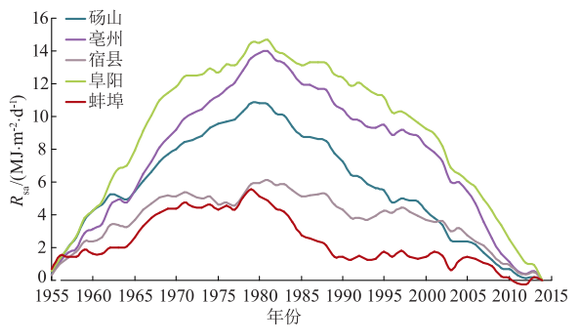


图 3　1955—2014 年淮北平原 R_s 年日均值累积距平

Fig. 3　Accumulative departure curves of total solar radiation in Huaibei plain in 1955—2014

从图 3 可以看出,1980 年为主要转折年,1955—1980 年淮北平原年日均 R_s 年际下降趋势不

明显,1980—2014 年年日均 R_s 具有明显年际下降趋势,R_s 基本均低于近 60 a 的平均水平.

2.2.2 季尺度

表 4 给出了各站点 1955—2014 年全年太阳总辐射和季太阳总辐射的均值,可以看出,淮北平原全年太阳总辐射总体趋势表现为北高南低;局部表现为平原北部从北到南呈现逐渐升高的趋势,平原南部则为从北到南逐渐降低,全年太阳总辐射最高值出现在平原中部地区(宿县),为 4 652.73 MJ/m^2. 分析主要原因在于总体趋势主要受纬度因素影响,局部的表现则主要受海拔因素影响.

表 4 淮北平原各站点 1955—2014 年平均 R_s

Tab. 4 Average total solar radiation in 1955—2014 in each station in Huaibei plain MJ/m^2

	春季	夏季	秋季	冬季	全年
砀山	1 375.24	1 520.28	985.51	734.47	4 615.50
亳州	1 370.74	1 529.11	988.42	740.78	4 629.05
宿县	1 367.09	1 522.76	1 005.46	757.43	4 652.73
蚌埠	1 323.21	1 486.02	982.26	741.24	4 532.73
阜阳	1 316.71	1 489.91	972.08	734.07	4 512.77

由表 4 中各季节数据可以看出,4 个季节中 R_s 的大小依次为夏季、春季、秋季、冬季. 各站点春季的 R_s 为 1 316.71 ~ 1 375.24 MJ/m^2,约占全年太阳总辐射的 29.43%,且呈现由北向南递减的趋势,表明春季 R_s 主要受纬度因素影响. 夏季 R_s 全年最高,R_s 值为 1 486.02 ~ 1 529.11 MJ/m^2,占全年总辐射的 32.90%,总体趋势为平原北部高于南部,但局部规律不明显,表明夏季 R_s 主要受纬度因素影响,但海拔和其他未知因素对其也有明显影响. 秋季各地的 R_s 值为 972.08 ~ 1 005.46 MJ/m^2,占全年 R_s 的 21.50% 总体趋势表现为平原北部高于南部,局部表现为平原北部从北到南呈升高的趋势,平原南部则为从北到南逐渐降低,表明秋季 R_s 总体趋势主要受纬度因素影响,局部变化由海拔因素主导. 冬季各地 R_s 值为 734.07 ~ 757.43 MJ/m^2,明显低于其他 3 季,为四季中最少的季节,仅占全年总辐射的 16.16%,趋势变化与秋季一致.

综合以上结果分析,文中认为提高 Angstrom 公式计算精度,除了用实测 R_s 数据率定系数 a,b 外,将海拔作为一项参数加入公式也可有效提高其计算精度. 这与周晋等[19]的研究结果是相符的.

2.2.3 月尺度

图 4 为不同月份各站点日均太阳总辐射量的变化趋势,其中 R_{sm} 为 R_s 月日均值,可以看到 5 个气象站点的太阳总辐射的随月份的变化呈现明显的单峰峰型分布,最大峰值出现在 6 月,12 月份为全年最低. 7—8 月虽然其 R_a 要大于 6 月份,但由于 7 月份已进入汛期,阴雨天气增多,导致日照时间减少,太阳总辐射受到削弱,因此其月日均 R_s 要低于 6 月;冬季阴雨天气较少,而 12 月份的 R_a 为全年最低值,因此其 R_s 也为全年最低值.

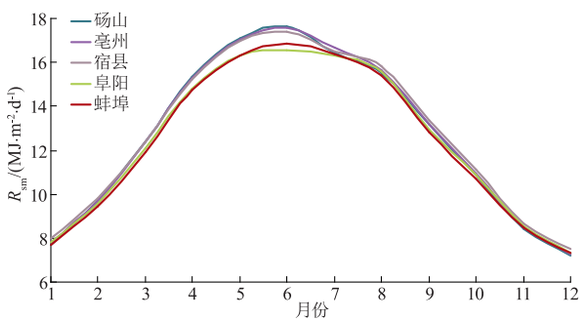


图 4 淮北平原不同月份月日均 R_s 的变化趋势

Fig. 4 Monthly distribution of daily averaged solar radiation in Huaibei plain

3 结 论

1) FAO 建议的经典参数 a,b 值并不适用于安徽省淮北平原,其较大估计了太阳总辐射及参考作物蒸发蒸腾量;通过遗传算法率定得出的 a,b 值可有效提高 R_s 和 ET_0 计算的准确性;但由于新马桥试验站位于淮北平原南部,因而单以此数据率定所得 a,b 值并不能做到精确覆盖整个淮北平原,后期还需在平原北部和中部地区的灌溉试验站增设自动气象站,以此增加淮北平原太阳总辐射数据的观测范围和率定精度.

2) 淮北平原 1955—2014 年 60 a 内的 R_s 从北到南总体上呈逐渐降低的趋势,且北部下降幅度明显低于平原南部,1980 年为主要转折年,1980 年之前安徽省淮北平原 R_s 年际下降趋势不明显,1980 年之后年日均 R_s 下降趋势明显.

3) 淮北平原 R_s 总体空间分布主要受纬度影响,呈现北高南低的趋势,局部变化受海拔因素影响明显;4 个季节中 R_s 的大小依次为夏季、春季、秋季、冬季;春季 R_s 从北到南依次降低,主要受纬度因素影响;秋冬季变化趋势与年变化趋势一致,纬度和海拔均对其有显著影响;夏季主要受纬度因素影响,但其他因素对其也有明显影响,因此其局部变化趋势无明显规律.

4) 安徽省淮北平原 R_s 年内变化趋势呈现为单

峰型分布,最大峰值出现在6月份,12月份最低;7,8月份较6月份阴雨天气增多,日照时数减少,以此7、8月份 R_s 要小于6月份.

参考文献(References)

[1] 王雅婕, 黄耀, 张稳. 1961—2003 年中国大陆地表太阳总辐射变化趋势[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(4):405 - 413.
WANG Yajie, HUANG Yao, ZHANG Wen. Changes in surface solar radiation in mainland China over the period from 1961 to 2003 [J]. Climatic and environmental research, 2009,14(4): 405 - 413. (in Chinese)

[2] 曹雯, 申双和. 我国太阳日总辐射计算方法的研究[J]. 南京气象学院学报, 2008,31(4): 587 - 591.
CAO Wen, SHEN Shuanghe. Estimation of daily solar radiation in China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2008,31(4): 587 - 591. (in Chinese)

[3] 曾燕,邱新法,刘昌明,等. 1960—2000 年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 水科学进展,2007,18(3): 311 - 318.
ZENG Yan, QIU Xinfa, LIU Changming, et al. Changes of pan evaporation in China in 1960—2000[J]. Advances in water science,2007,18(3): 311 - 318. (in Chinese)

[4] LIU X Y, MEI X R, LI Y Z, et al. Evaluation of temperature - based global solar radiation models in China. [J]. Agricultural & forest meteorology, 2009, 149(9): 1433 - 1446.

[5] 史建国,严昌荣,何文清,等. 黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析[J]. 干旱区研究, 2007, 24(6):773 - 778.
SHI Jianguo, YAN Changrong, HE Wenqing, et al. Study on spatiotemporal change of evapotranspiration in the Yellow River Basin[J]. Arid zone research, 2007, 24(6):773 - 778. (in Chinese)

[6] 卢燕宇,田红,鲁俊,等. 近50年安徽省太阳总辐射的时空变化特征[J]. 气象科技,2016,44(5):769 - 775.
LU Yanyu, TIAN Hong, LU Jun, et al. Spatial - temporal variation characteristics of gross solar radiation in Anhui Province from 1961 to 2010 [J]. Meteorological science and technology,2016,44(5):769 - 775. (in Chinese)

[7] 杜尧东, 毛慧琴, 刘爱君,等. 广东省太阳总辐射的气候学计算及其分布特征[J]. 资源科学, 2003, 25(6):66 - 70.
DU Yaodong, MAO Huiqin, LIU Aijun, et al. The climatological calculation and distributive character of global solar radiation in Guangdong Province [J]. Resources science, 2003, 25(6):66 - 70. (in Chinese)

[8] 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):53 - 58.
ZHAO Jun, LI Wangping, LI Fei. Climatological calculation and analysis of global solar radiation in the Loess Plateau[J]. Arid zone research, 2008, 25(1): 53 - 58. (in Chinese)

[9] 文小航. 中国大陆太阳辐射及其与气象要素的关系研究[D]. 兰州:兰州大学, 2008.

[10] 胡庆芳,杨大文,王银堂,等. Angstrom 公式参数对 ET_0 的影响及 FAO 建议值适用性评价[J]. 水科学进展, 2010, 21(5):644 - 652.
HU Qingfang, YANG Dawen, WANG Yintang, et al. Effects of Angstrom coefficients on ET_0 estimation and the applicability of FAO recommended coefficient values in China[J]. Advances in water science, 2010, 21(5):644 - 652. (in Chinese)

[11] 杨贵羽,王知生,王浩,等. 海河流域 ET_0 演变规律及灵敏度分析[J]. 水科学进展, 2009, 20(3):409 - 415.
YANG Guiyu, WANG Zhisheng, WANG Hao, et al. Potential evapotranspiration evolution rule and its sensitivity analysis in Haihe River basin[J]. Advances in water science, 2009, 20(3): 409 - 415. (in Chinese)

[12] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法[J]. 气象学报, 1964, 34(3):304 - 315.
WENG Duming. Discussion on the climatological method of global solar radiation calculation[J]. Acta metrologica sinica, 1964, 34 (3):304 - 315. (in Chinese)

[13] 鞠晓慧, 屠其璞, 李庆祥. 我国太阳总辐射气候学计算方法的再讨论[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(4):516 - 521.
JU Xiaohui, TU Qipu, LI Qingxiang. Discussion on the climatological calculation of solar radiation[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2005, 28(4):516 - 521. (in Chinese)

[14] 金菊良, 杨晓华, 丁晶. 标准遗传算法的改进方案——加速遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(4):8 - 13.
JIN Juliang, YANG Xiaohua, DING Jing. An improved simple genetic algorithm—accelerating genetic algorithm [J]. Systems engineering theory & practice, 2001, 21(4):8 - 13. (in Chinese)

[15] 买苗, 火焰, 曾燕,等. 江苏省太阳总辐射的分布特征[J]. 气象科学, 2012, 32(3):269 - 274.
MAI Miao, HUO Yan, ZENG Yan, et al. The distribu-

tion characteristics of total solar radiation in Jiangsu province[J]. Journal of the meteorological sciences, 2012, 32(3):269 - 274. (in Chinese)

[16] 马金玉, 罗勇, 申彦波,等. 近50年中国太阳总辐射长期变化趋势[J]. 中国科学:地球科学, 2012, 42(10):1597 - 1608.
MA Jinyu, LUO Yong, SHEN Yanbo, et al. Regional long - term trend of ground solar radiation in China over the past 50 years[J]. Science china earth sciences, 2012, 42(10):1597 - 1608. (in Chinese)

[17] 崔日鲜. 山东省太阳总辐射的时空变化特征分析[J]. 自然资源学报, 2014,29(10):1780 - 1791.
CUI Rixian. The analysis of spatiotemporal variation characteristics of global solar radiation in Shandong Province[J]. Journal of natural resources, 2014, 29(10):1780 - 1791. (in Chinese)

[18] 马金玉, 罗勇, 梁宏,等. 中国近半个世纪地面太阳总辐射时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(2):268 - 280.
MA Jinyu, LUO Yong, LIANG Hong, et al. Spatial and temporal variation of total solar radiation in China in recent 50 years[J]. Journal of natural resources, 2012, 27(2):268 - 280. (in Chinese)

[19] 周晋, 吴业正, 晏刚. 中国太阳总辐射的日照类估算模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(6):925 - 927.
ZHOU Jin, WU Yezheng, YAN Gang. Sunshine - based model for estimating global solar radiation in China[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(6):925 - 927. (in Chinese)

(责任编辑 谈国鹏)

(上接第396页)

[7] GUINZBURG A, BRENNEN C E, ACASTO A J, et al. Experimental results for the rotordynamic characteristics of leakage flows in centrifugal pumps[J]. Journal of fluids engineering, 1994, 116(1): 110 - 115.

[8] KIM E, PALAZZOLO A. Rotordynamic force prediction of a shrouded centrifugal pump impeller—part 1: numerical analysis[J]. Journal of vibration and acoustics, 2016, 138(3):1 - 10.

[9] DING H, VISSER F C, JIANG Y, et al. Demonstration and validation of a 3D CFD simulation tool predicting pump performance and cavitation for industrial applications[J]. Journal of fluids engineering, 2011, 133(1): 1 - 14.

[10] 张塬东, 张琼, 吴大转, 等. 立式双级自吸泵水力性能分析及内部结构改进[J]. 流体机械, 2017, 45(9): 33 - 39.
ZHANG Yuandong, ZHANG Qiong, WU Dazhuan, et al. Improvement design of a vertical double-stage self-priming pump[J]. Fluid machinery, 2017, 45(9):33 - 39. (in Chinese)

[11] 李文广, 费振桃, 蔡永雄. 离心油泵叶轮口环间隙对性能的影响[J]. 水泵技术, 2004(5): 7 - 13.
LI Wenguang, FEI Zhentao, CAI Yongxiong. Effect of clearance of wear-ring on the centrifugal oil pump[J]. Pump technology, 2004(5): 7 - 13. (in Chinese)

[12] 郭豹, 刘厚林, 王纳秀, 等. 高温熔盐泵的模态计算与分析[J]. 流体机械, 2016, 44(3):45 - 49.
GUO Bao, LIU Houlin, WANG Naxiu, et al. Modal analysis of molten salt pump at high temperature[J]. Fluid machinery, 2016, 44(3):45 - 49. (in Chinese)

[13] 赵伟国. 基于CFD的离心泵口环间隙流动研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.

[14] 吴大转, 许斌杰, 武鹏, 等. 多级离心泵内部间隙流动与泄漏损失[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(8):1393 - 1398.
WU Dazhuan, XU Binjie, WU Peng, et al. Internal clearance flow and leakage loss in multistage centrifugal pump[J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2011, 45(8):1393 - 1398. (in Chinese)

[15] HIRANO T, GUO Zenglin, GORDON K R, et al. Application of computational fluid dynamics analysis for rotating machinery—part II: labyrinth seal analysis[J]. Journal of engineering for gas turbines and power, 2005, 127:820 - 826.

[16] 蒋庆磊, 翟璐璐, 吴大转, 等. 多级离心泵内叶轮出口压力脉动研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(4): 599 - 602.
JIANG Qinglei, ZHAI Lulu, WU Dazhuan, et al. Pressure fluctuation at impeller outlet in multistage pump[J]. Journal of engineering thermophysics, 2012, 33(4): 599 - 602. (in Chinese)

[17] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社, 2011.

(责任编辑 陈建华)