

# 基于Ångström-Prescott公式的中国太阳辐射与日照时间的关系研究

黄仲冬<sup>1,2</sup>, 郭乙霏<sup>3</sup>, 张彦<sup>1,2</sup>, 梁志杰<sup>1,2</sup>, 齐学斌<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2. 中国农业科学院 农业水资源高效安全利用重点开放实验室, 河南 新乡 453002; 3. 东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:**【目的】揭示中国不同地区太阳辐射与日照时间的定量关系,为缺资料地区太阳辐射的准确估算提供科学依据。【方法】基于114个地面辐射观测站和常规气象观测站1958—2016年的实测数据,在时间和空间上分别评价Ångström-Prescott(Å-P)公式的适用性,运用ArcGIS地统计分析工具探索Å-P公式系数 $a$ 、 $b$ 的空间分布规律,采用空间分析工具获取了各省级行政区的系数 $a$ 、 $b$ 。【结果】Å-P公式在时间上具有可靠的预测性能,各站点计算值与观测值的标准化均方根误差(NRMSE)和标准化平均绝对误差(NMAE)的均值分别为0.103和0.079;在空间上有良好的扩展性,各站点NRMSE和NMAE的均值分别为0.103和0.078;从全国范围来看,系数 $a$ 介于0.117~0.345之间,其变化规律为由东南沿海向西北内陆逐渐增大;系数 $b$ 介于0.345~0.703之间,变化规律与系数 $a$ 相反。利用各省级行政区系数 $a$ 、 $b$ 计算的各站点月平均日太阳辐射量与实测值进行对比,NRMSE和NMAE均值分别为0.105和0.081。【结论】Å-P公式能够比较准确地描述中国不同地区月平均日太阳辐射量与月平均日照时间的定量关系,可通过空间插值的方法获取缺资料地区的公式系数,采用各省级行政区系数 $a$ 、 $b$ 估算的月平均日太阳辐射量具有较高精度。

**关键词:**太阳辐射;日照时间;Ångström-Prescott公式;空间插值

中图分类号:S161.1

文献标志码:A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.20180412

黄仲冬,郭乙霏,张彦,等. 基于Ångström-Prescott公式的中国太阳辐射与日照时间的关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2019,38(4):77-83.

## 0 引言

太阳辐射是地球表层能量的主要来源,同时也是植物蒸发蒸腾的主要驱动力<sup>[1-2]</sup>,其准确估算对于水文过程、生态过程和生物化学过程模拟具有十分重要的意义<sup>[3]</sup>。由于地面辐射观测站数量有限,而常规气象站数量较多,因此,利用容易获取的气象因子建立与太阳辐射之间的定量关系一直备受关注<sup>[4]</sup>。目前,估算太阳辐射量最常用的方法是基于Ångström-Prescott公式(简称Å-P公式)的日照时间法<sup>[5]</sup>。

近年来,国内外学者基于Å-P公式在太阳辐射与日照时间的定量关系方面开展了不少研究。El-sebaai等<sup>[6]</sup>探讨了沙特阿拉伯吉达地区月平均日太阳辐射量与日照时间的关系,发现Å-P公式在干旱区具有较好的适用性;周秉荣等<sup>[7]</sup>根据1961—2008年16个气象台站的观测数据应用Å-P公式建立了三江源地区太阳辐射与日照时间的定量关系,并揭示了月和年尺度上太阳辐射量的时空分布特征;Liu等<sup>[8]</sup>分析了Å-P公式在黄河流域的适用性,发现Å-P公式在不同时间尺度上具有明显差异,其适用性在日和月尺度上较强,而在年尺度上较差;胡庆芳等<sup>[9]</sup>基于中国104个地面站的观测数据,提出了Å-P公式系数的地区综合取值方法;Liu等<sup>[10]</sup>基于中国6个地面站的观测数据揭示了Å-P公式系数的动态变化特征。中国目前有739个常规气象观测站,但仅有130个太阳辐射观测站(其中只有114个站具有日照时间观测数据),因此,基于Å-P公式研究太阳辐射与日照时间的定量关系,对于缺资料地区太阳辐射的准确估算具有重要的科学意义和参考价值。尽

收稿日期:2018-07-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51609249);中国农业科学院基本科研业务费专项(FIRI2016-11)

作者简介:黄仲冬(1981-),男,四川绵竹人。副研究员,主要从事农业水文过程及模拟研究。E-mail: zdhuang@126.com

通信作者:齐学斌(1963-),男,陕西户县人。研究员,主要从事农业水资源方面的研究工作。E-mail: qxb6301@sina.cn

管国内外对此已经开展了相关研究,但对 Å-P 公式在中国地区适用性的研究仍有所欠缺。在时间上,利用以往资料建立的 Å-P 公式能否准确预测现在和未来的太阳辐射量?在空间上,利用已有站点数据建立的 Å-P 公式能否扩展到其他缺资料地区?按照省级行政区划获取的 Å-P 公式能否准确估算不同地区的太阳辐射量?为回答该问题,利用中国 114 个地面太阳辐射站和常规气象站 1958—2016 年的月平均日太阳辐射量和日照时间观测数据,在时间和空间上分别对 Å-P 公式的适用性进行评价,运用 ArcGIS 地统计分析工具探索 Å-P 公式系数的空间分布特征,采用空间分析工具获取各省级行政区的 Å-P 公式系数并评价其可靠性。

## 1 材料与方法

### 1.1 Å-P 公式

描述月平均日太阳辐射量与月平均日照时间定量关系的 Å-P 公式<sup>[1]</sup>为:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{S}{S_0}, \quad (1)$$

式中: $H$ 为月平均日太阳辐射量( $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ); $H_0$ 为月平均日天文辐射量( $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ); $S$ 为月平均日照时间(h); $S_0$ 为月平均最大可能日照时间(h); $a$ 、 $b$ 为经验系数。

$H_0$ 和  $S_0$ 的计算公式<sup>[1]</sup>为:

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360J}{365} \right) \right] (\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \sin \varphi \sin \delta), \quad (2)$$

$$\delta = 23.45 \sin \left( 360 \frac{J + 284}{365} \right), \quad (3)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta), \quad (4)$$

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_s, \quad (5)$$

式中: $I_{sc}$ 为太阳常数, $I_{sc} = 4.92 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $\varphi$ 为纬度( $^\circ$ );  $\delta$ 为太阳倾角( $^\circ$ );  $\omega_s$ 为太阳时角( $^\circ$ );  $J$ 为日序。

### 1.2 数据来源及分析方法

从中国气象网(<http://data.cma.cn/>)地面气象资料观测网络中选取同时具有太阳辐射和日照时间的观测站 114 个(图 1),利用 R 软件对 1958—2016 年的配对数据进行处理和统计分析<sup>[2]</sup>。由于受各种因素的影响,太阳辐射和日照时时间观测数据在不同程度上存在缺失和异常,为避免缺失值和异常值带来的影响,在统计分析之前对数据进行处理:①利用日值数据计算  $H$ 、 $H_0$ 、 $S$  和  $S_0$ ,舍弃每月时间小于 20 d 的数据,以保证月数据的代表性;②舍弃  $H/H_0$  和  $S/S_0$  大于 1 的数据,以确保数据具有真实的物理意义;③舍弃每年月数小于 12 的数据,以确保年数据的完整性。经过处理后,114 个站点的数据系列长度如图 1 所示。



图 1 114 个站点空间分布及数据系列长度

各站点的Å-P公式使用最小二乘法进行拟合,并采用2种方法进行验证:①按照年份先后顺序分别对各站点的数据进行分割,前3/4的数据作为训练数据集用于拟合公式,后1/4的数据作为测试数据集用于验证公式(例如,对于具有20 a系列长度的站点,选择前15 a的数据为训练集,后5 a的数据为测试集);②在空间上对各站点的数据进行分割,选择其中113个站点的数据作为训练数据集拟合公式获取公式系数,对113个站点的公式系数进行空间插值得到剩余站点的公式系数,再利用剩余站点的数据作为测试数据集对公式进行验证,对每个站点重复上述过程。第一种方法用于验证Å-P公式在时间上的预测效果,第二种方法用于验证Å-P公式在空间上的预测效果。

采用决定系数( $R^2$ )对Å-P公式的拟合效果进行评价,采用标准化的平均绝对误差( $NMAE$ )和标准化的均方根误差( $NRMSE$ )对Å-P公式的适用性进行评价<sup>[13]</sup>,计算公式分别为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - C_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - u)^2}, \quad (6)$$

$$NRMSE = \frac{1}{u} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - C_i)^2}{n}}, \quad (7)$$

$$NMAE = \frac{1}{u} \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - C_i|}{n}, \quad (8)$$

式中: $O_i$ 为第*i*个观测值; $C_i$ 为第*i*个计算值; $u$ 为观测值的均值; $n$ 为观测值的个数。依据文献[11],不同评价等级 $NMAE$ 和 $NRMSE$ 的取值范围如表1所示。

表1 不同评价等级 $NRMSE$ 和 $NMAE$ 的取值范围

评价指标	优	良	中	差
$NRMSE$	< 0.10	0.10~0.20	0.20~0.30	> 0.30
$NMAE$	< 0.05	0.05~0.10	0.10~0.15	> 0.15

Å-P公式系数 $a$ 、 $b$ 的空间分布采用经验贝叶斯克里金法插值得到,各省级行政区的系数按照面积进行分区统计获取<sup>[14-15]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 Å-P公式适用性评价

#### 2.1.1 拟合效果评价

决定系数( $R^2$ )的大小表征月平均日照时间对月平均日太阳辐射量变异性的解释程度,是Å-P公式拟合效果的重要评判指标。利用114个站点的训练数据集分别对Å-P公式进行拟合,得到 $R^2$ 的空间分布,如图2所示。

从图2可以看出,114个站点 $R^2$ 的平均值为0.683,中位数为0.722,最小值0.136,最大值0.945;其中,49个站点的 $R^2$ 大于0.750,47个站点的 $R^2$ 介于0.500~0.750之间,16个站点的 $R^2$ 介于0.250~0.500之间,仅有2个站点的 $R^2$ 小于0.250。 $R^2$ 较小的站点主要位于新疆、西藏和内蒙古自治区等偏远地区。

分别采用 $F$ 检验和 $t$ 检验对拟合公式和系数 $a$ 、 $b$ 的显著性进行检验,结果表明,所有站点拟合公式和系数 $a$ 、 $b$ 的统计量均达到极显著( $\alpha = 0.01$ )水平。

#### 2.1.2 时间上的预测效果评价

利用114个站点的测试数据集分别对Å-P公式在时间上的预测效果进行分析,实测值与计算值的评价指标 $NRMSE$ 和 $NMAE$ 的空间分布如图3所示。从图3可看出,所有站点 $NRMSE$ 和 $NMAE$ 的平均值分别为0.103和0.079,中位数分别为0.094和0.073,最小值分别为0.039和0.030,最大值分别为0.245和0.189。从 $NRMSE$ 指标来看,有63个站点的 $NRMSE$ 小于0.100,37个站点介于0.100~0.150之间,12个站点介于0.150~

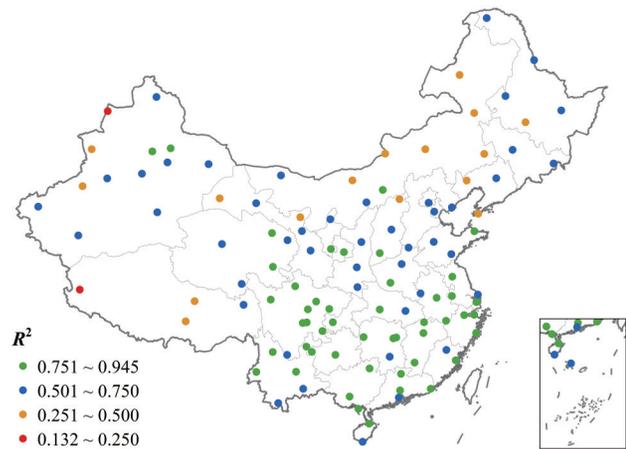


图2 各站点拟合效果评价指标

0.200之间,仅有2个站点大于0.200,分别是韶关和常宁。从 $NMAE$ 指标来看,有90个站点的 $NMAE$ 在0.100以内,21个站点介于0.100~0.150之间,仅有3个站点超过0.150,分别是贵阳、韶关和常宁。从各站点评价指标可以看出, $\hat{A}$ - $P$ 公式在时间上具有良好的预测效果。

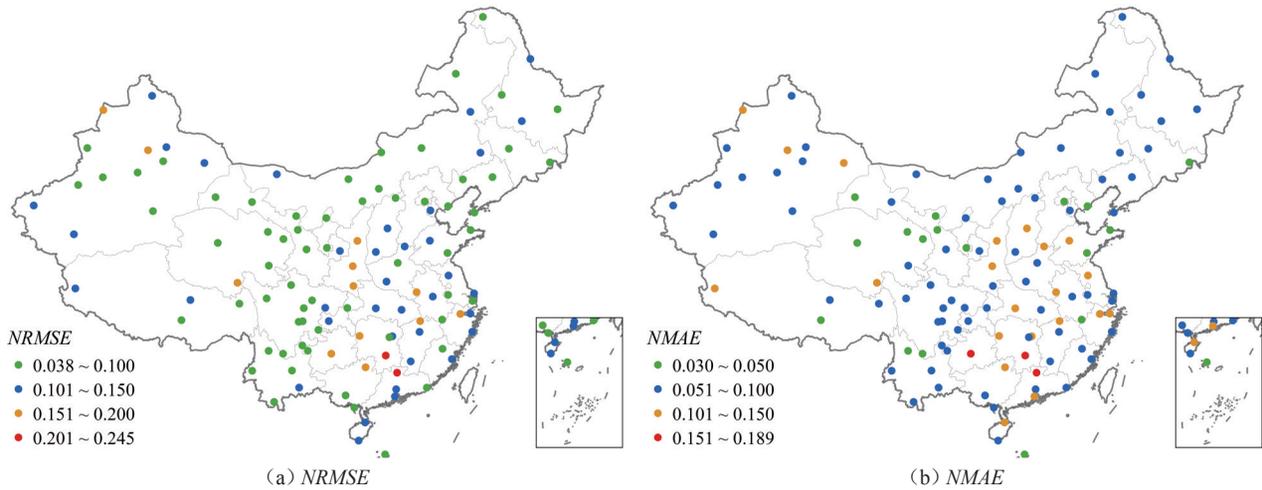


图3 各站点时间上的预测效果评价指标

### 2.1.3 空间上的预测效果评价

采用空间验证的方法对 $\hat{A}$ - $P$ 公式的预测效果进行分析,得到114个站点 $NRMSE$ 和 $NMAE$ 的空间分布,结果如图4所示。从图4可以得出, $NRMSE$ 和 $NMAE$ 的平均值分别为0.103和0.078,中位数分别为0.098和0.074,最小值分别为0.045和0.036,最大值分别为0.225和0.165。从 $NRMSE$ 指标来看,有62个站点的 $NRMSE$ 小于0.100,41个站点介于0.100~0.150之间,10个站点介于0.150~0.200之间,仅有1个超过0.200,为常宁。从 $NMAE$ 指标来看,有96个站点的 $NMAE$ 小于0.100,16个站点介于0.100~0.150之间,仅有2个站点大于0.150,分别是乐山和常宁。从各站点的评价指标可以看出, $\hat{A}$ - $P$ 公式在空间上也具有良好的预测效果。此外,系数 $a$ 、 $b$ 的空间扩展方法,即利用已有站点数据拟合得到系数 $a$ 、 $b$ ,再进行空间插值获取其他站点系数 $a$ 、 $b$ ,以此来估算月平均日太阳辐射量,具有较高的可靠性。

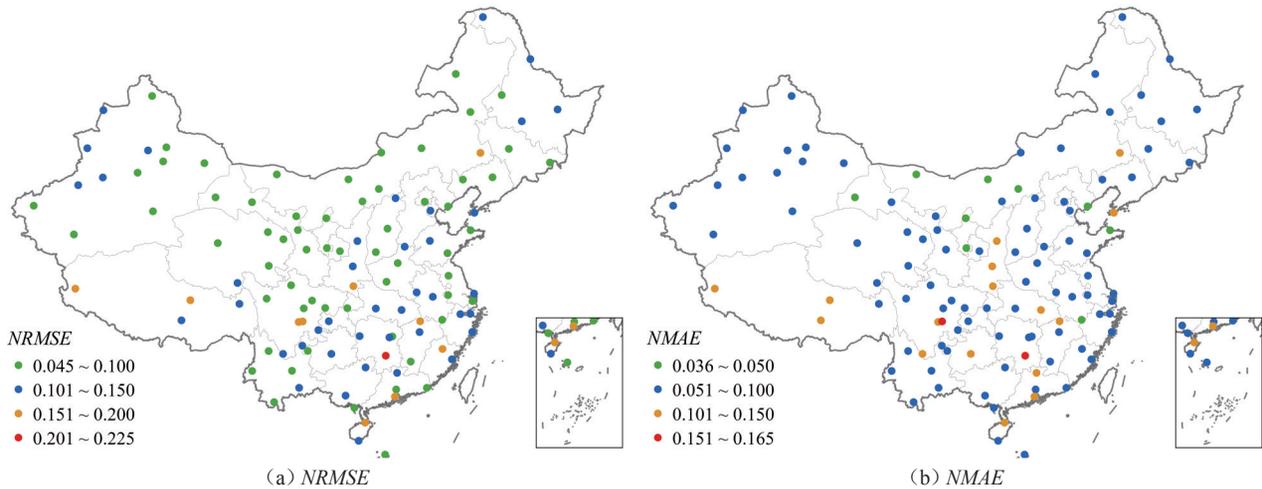


图4 各站点空间上的预测效果评价指标

## 2.2 $\hat{A}$ - $P$ 公式系数空间分布特征

图5显示了 $\hat{A}$ - $P$ 公式系数的空间分布。从全国范围来看,各站点系数 $a$ 介于0.117~0.345之间。系数 $a$ 表示阴天( $S/S_0 = 0$ )天文总辐射到达地面的比率,与西北地区相比,我国东南地区阴天天气较多且云层较厚、空气湿润、降水频繁,阴天达到地面的太阳辐射相对较少,因此,系数 $a$ 的变化规律大致为由东南沿海向西北内陆逐渐增大。系数 $b$ 介于0.345~0.703之间,东北和西北地区偏小,南方地区偏大,其变化规律与系数 $a$ 相反。

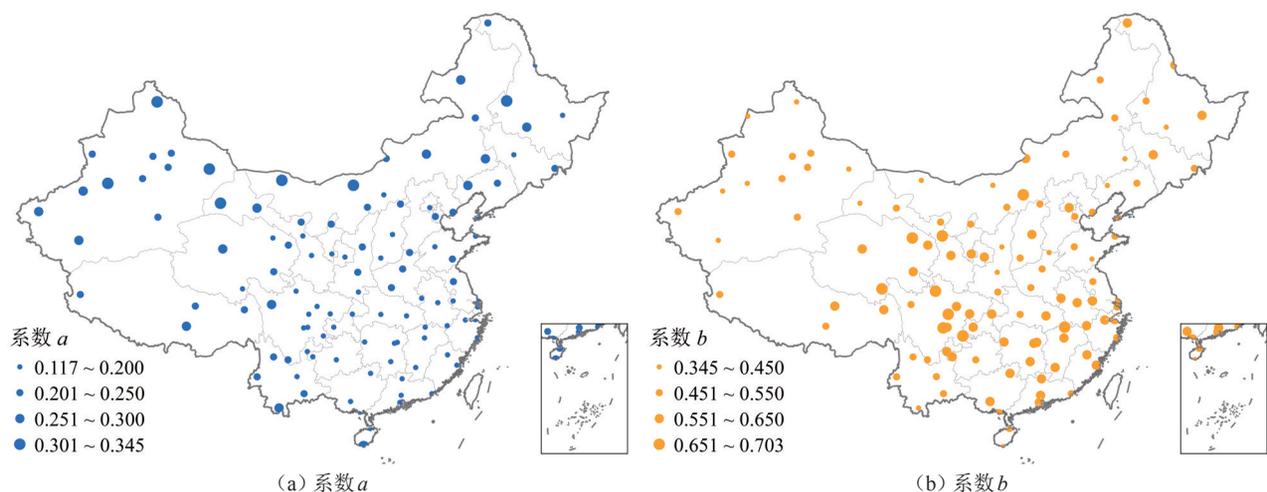


图5 Å-P公式系数a和b的空间分布

### 2.3 各省级行政区的Å-P公式系数

对Å-P公式系数进行空间插值,利用ArcGIS空间分析工具获取不同省级行政区的系数(表2),为工程技术人员和科研工作者在实际应用和科学研究中提供参考。将各站点的评价指标按照省级行政区进行统计,结果显示,四川省的NRMSE和NMAE最高,河北省的最低;除四川省外,其他省级行政区的NRMSE均小于0.150;除四川省、西藏自治区和湖南省外,其他省级行政区的NMAE均小于0.100。从评价指标来看,按照省级行政区划分获取的Å-P公式系数对于估算月平均日太阳辐射量具有较高的可靠性。

表2 各省级行政区的Å-P公式系数及评价指标

序号	省级行政区	a	b	NRMSE	NMAE	序号	省级行政区	a	b	NRMSE	NMAE
1	安徽省	0.160	0.560	0.084±0.030	0.065±0.021	17	吉林省	0.215	0.501	0.086±0.003	0.064±0.003
2	北京市	0.195	0.527	0.068±0.000	0.054±0.000	18	辽宁省	0.224	0.470	0.107±0.038	0.080±0.028
3	重庆市	0.140	0.578	0.116±0.000	0.088±0.000	19	内蒙古自治区	0.248	0.510	0.091±0.039	0.068±0.032
4	福建省	0.165	0.576	0.125±0.030	0.082±0.005	20	宁夏回族自治区	0.199	0.556	0.055±0.001	0.042±0.001
5	甘肃省	0.233	0.530	0.077±0.013	0.057±0.012	21	青海省	0.232	0.569	0.082±0.029	0.059±0.018
6	广东省	0.149	0.571	0.122±0.036	0.096±0.030	22	陕西省	0.196	0.512	0.134±0.037	0.095±0.028
7	广西壮族自治区	0.161	0.569	0.105±0.026	0.078±0.017	23	山东省	0.206	0.482	0.071±0.028	0.056±0.021
8	贵州省	0.153	0.583	0.106±0.045	0.082±0.036	24	上海市	0.168	0.549	0.082±0.000	0.068±0.000
9	海南省	0.226	0.468	0.110±0.032	0.086±0.025	25	山西省	0.193	0.523	0.095±0.011	0.073±0.010
10	河北省	0.210	0.507	0.051±0.000	0.036±0.000	26	四川省	0.196	0.593	0.157±0.056	0.138±0.056
11	黑龙江省	0.221	0.526	0.108±0.009	0.081±0.005	27	台湾省	0.169	0.561	-	-
12	河南省	0.198	0.497	0.090±0.017	0.071±0.015	28	天津市	0.209	0.503	0.101±0.000	0.078±0.000
13	湖北省	0.153	0.558	0.128±0.013	0.093±0.008	29	新疆维吾尔自治区	0.275	0.455	0.092±0.018	0.070±0.013
14	湖南省	0.135	0.598	0.139±0.057	0.105±0.039	30	西藏自治区	0.249	0.539	0.139±0.036	0.105±0.027
15	江苏省	0.188	0.521	0.101±0.015	0.075±0.039	31	云南省	0.221	0.506	0.094±0.011	0.073±0.007
16	江西省	0.144	0.600	0.117±0.029	0.090±0.022	32	浙江省	0.158	0.576	0.111±0.018	0.086±0.014

注 香港和澳门特别行政区可采用广东省的系数;NRMSE和NMAE的数值格式为均值±标准差。由于台湾省站点的数据目前不能获取,因此无法计算其NRMSE和NMAE,其a和b系数是采用空间插值得到的。

## 3 讨论

Å-P公式以简单线性函数的形式刻画了月平均日太阳辐射量与日照时间之间的关系,尽管该公式最早作为经验公式被提出,但最近的一些研究表明<sup>[6]</sup>,其也具有明确的物理意义。公式中的系数a表示阴天( $S/S_0=0$ )天文辐射达到地面的比率,系数a+b表示晴天( $S/S_0=1$ )天文辐射达到地面的比率。研究<sup>[7]</sup>发现,引起不同地区系数a、b差异的因素包括纬度、海拔高度、季节、降水、空气湿度、云层类型、大气气溶胶浓度等,其中,系数a主要由当地云层的类型决定。尽管对系数a、b的物理意义和影响因素有了进一步的认识,但在理论上关于系数a、b的计算方法尚未形成,仍然需要通过站点观测值拟合得到,这在一定程度上限制了Å-P公式在缺资料地区的应用。本文通过空间插值的方法,将已有站点的系数a、b在空间上进行扩展,进而获取其

他站点的系数,观测值与计算值对比的评价指标表明,该方法对于缺资料地区月平均日太阳辐射量估算具有较高的可靠性。

从评价指标来看,各站点 $R^2$ 、 $NRMSE$ 和 $NMAE$ 的空间分布并不一致。 $R^2$ 偏小的站点主要分布在新疆、西藏和内蒙古自治区等偏远地区,而 $NRMSE$ 和 $NMAE$ 较大的站点大多位于南方地区。 $R^2$ 表征Å-P公式对数据的拟合效果,而 $NRMSE$ 和 $NMAE$ 表征Å-P公式的预测性能。由此可见,拟合效果好不一定表明其预测性能好,拟合效果差也不一定表明其预测性能差。如西藏葛尔站点,虽然 $R^2$ 为0.132,但在时间和空间预测效果上 $NRMSE$ 和 $NMAE$ 均小于0.150;而对于湖南常宁站点,尽管其 $R^2$ 为0.640,但在时间和空间预测效果上 $NRMSE$ 和 $NMAE$ 却分别大于0.200和0.150。太阳辐射与日照时间的关系不仅取决于地理位置、高程、地形,还与当地的云层类型与厚度、气溶胶成分与浓度、空气湿度、降水等因素密切相关,同时也受到观测仪器、测量误差、站点密度、数据系列长度以及其他人为因素的影响。由于各种复杂因素的综合作用,使得个别站点拟合效果好但预测误差大或者拟合效果差但预测误差小的情况出现,如何准确量化这些因素对Å-P公式拟合效果和预测性能的影响,有待进一步研究。

由于受各种因素的影响,太阳辐射和日照时间观测数据在不同程度上存在异常,兹首先对观测数据进行了清理,剔除了 $S/S_0$ 大于1或 $H/H_0$ 大于1的数据,但这些数据也仅仅是异常数据的一部分。其他数据,如日照时间很小但太阳辐射很大或者日照时间很大而太阳辐射很小的数据,也明显偏离了拟合直线。异常数据的存在会对Å-P公式的拟合效果造成一定影响,同时也会对公式的预测精度产生影响<sup>[18]</sup>。剔除所有的异常数据必然会提高模拟的精度,但同时也掩盖了异常数据产生的机制,未来应充分研究异常数据的特征及其产生的原因,以进一步提高对太阳辐射和日照时间关系的认知。

## 4 结论

1)Å-P公式在中国具有良好的适用性,可用来描述不同地区月平均日太阳辐射量与日照时间的关系;对于缺资料地区,可通过空间插值的方法获取公式系数,进而根据日照时间估算月平均日太阳辐射量。

2)中国地区Å-P公式系数 $a$ 介于0.117~0.345之间,其变化规律为由东南沿海向西北内陆逐渐增大;系数 $b$ 介于0.345~0.703之间,变化规律与系数 $a$ 相反。

3)按照省级行政区划获取的系数 $a$ 、 $b$ 能够比较准确地估算中国不同地区的月平均日太阳辐射量。

致谢:感谢国家气象信息中心(中国气象局气象数据中心)提供数据资料。

## 参考文献:

- [1] 苗正伟,徐利岗,张薇.京津冀地区参考作物蒸散量变化特征与成因分析[J].灌溉排水学报,2018,37(5):39-50.
- [2] 郭金路,谷健,杨筑筑.辽西地区潜在蒸散发敏感性分析及变化成因研究[J].灌溉排水学报,2018,37(1):121-128.
- [3] 何洪林,于贵瑞,牛栋.复杂地形条件下的太阳资源辐射计算方法研究[J].资源科学,2003,25(1):78-85.
- [4] 毛飞,赵玉金,孙涵,等.1961—2010年中国Ångström-Prescott系数时空变化特征[J].气象与环境科学,2016,39(1):43-51.
- [5] BAKIRCI K. Models of solar radiation with hours of bright sunshine: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(9): 2 580-2 588.
- [6] EL-SEBAILI A A, AL-HAZMI F S, AL-GHAMDI A A et al. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia[J]. Applied Energy, 2010, 87: 568-576.
- [7] 周秉荣,彦亮东,校瑞香.三江源地区太阳辐射与日照时空分布特征[J].资源科学,2012,34(11):2 074-2 079.
- [8] LIU X, MEI X, LI Y, et al. Calibration of the Ångström-Prescott coefficients (a, b) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin[J]. Agricultural and forest meteorology, 2009, 149(3/4): 697-710
- [9] 胡庆芳,杨大文,王银堂,等.Ångström公式参数与 $ET_0$ 的影响及FAO建议值适用性评价[J].水科学进展,2010,21(5):644-652.
- [10] LIU J, LINDERHOLM H, CHEN D, et al. Changes in the relationship between solar radiation and sunshine duration in large cities of China[J]. Energy, 2015, 85: 589-600.
- [11] BESHARAT F, DEGHAN A A, FAGHIH A R. Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 21: 798-821.
- [12] R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing[EB/OL]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org>, 2018.
- [13] DESPOTOVIC, M, NEDIC V, DESPOTOVIC D, et al. Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 1 869-1 880.
- [14] PILZ J, SPOCK G. Why do we need and how should we implement Bayesian kriging methods[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2008, 22(5): 621-632.

- [15] 朱玲玲, 张竟竟, 李治国, 等. 基于SPI的河南省冬小麦生育期干旱时空变化特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(5): 51-58.
- [16] PAULESCU M, STEFU N, CALINOIU D, et al. Ångström-Preseott equation: Physical basis, empirical models and sensitivity analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 62: 495-506.
- [17] LIN W. A general correlation for estimating the monthly average daily direct radiation incident on a horizontal surface in Yunnan Province, China[J]. 1988, 41(1): 1-3.
- [18] SUEHRCKE H, BOWDEN R S, HOLLANDS K G T. Relationship between sunshine duration and solar radiation[J]. Solar Energy, 2013, 92: 160-171.

## Using the Ångström-Preseott Formula to Calculate Solar Radiation from Sunshine Duration in China

HUANG Zhongdong<sup>1,2</sup>, GUO Yifei<sup>3</sup>, ZHANG Yan<sup>1,2</sup>, LIANG Zhijie<sup>1,2</sup>, QI Xuebin<sup>1,2\*</sup>

(1. Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Key Laboratory of High-efficient and Safe Utilization of Agricultural Water Resources,  
Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

3. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Haerbin 150030, China)

**Abstract:** 【Objective】Duration of sunshine is much easier to measure than solar radiation, and their quantitative relationship is thus useful for regions lacking of solar radiation measurements. This paper aims to examine the feasibility of using the Ångström-Preseott (Å-P) formula to estimate solar radiation. 【Method】Sunshine duration and solar radiation measured in 1958 to 2016 across 114 sites in China were used to evaluate the Å-P formula. Spatial distribution of the coefficient a and b in the Å-P formula across the country was studied using geographic information system. 【Result】Comparison with measurements revealed that for a specific site, the Å-P formula was reliable, giving rise to a normalized root mean square error (*NRMSE*) of 0.103 and a normalized mean absolute error (*NMAE*) of 0.079. The formula was also spatially scalable, with *NRMSE* and *NMAE* being 0.103 and 0.078 respectively. Across the country, the coefficient a and b varied in the range of 0.117~0.345 and 0.345~0.703 respectively, with the coefficient a increasing from southeast to northeast while b varying in the opposite direction. The average *NRMSE* and *NMAE* of the calculated monthly average daily solar radiation were 0.105 and 0.081, respectively, at provincial scales. 【Conclusion】The Å-P formula accurately describes the relationship between monthly-average solar radiation and sunshine duration in China. For region without metrological data, one can use interpolation to fill the gap. To ensure accuracy, the coefficients a and b in the formula should be spatial dependent, taking values estimated at provincial scale.

**Key words:** solar radiation; sunshine duration; Ångström-Preseott formula; spatial interpolation

责任编辑:刘春成